

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**  
(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра мікроелектроніки**  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 621.372.41

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ О. В.Борисов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” травня 2018 р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 153 "Мікро- та наносистемна техніка" \_\_\_\_\_  
(код і назва)

на тему: Оптично керовані частотноселективні структури НВЧ на основі  
неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній

Виконав: студент \_\_\_\_2\_\_\_\_ курсу, групи ДП-61м  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Мазур Костянтин Сергійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ ст.викл., к.т.н., Діденко Ю. В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю \_\_\_\_\_ доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань \_\_\_\_\_ ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## Реферат

**Структура і обсяг роботи:** 92 сторінок, 33 ілюстрації, 31 таблиця, 22 джерела за переліком посилань.

**Актуальність теми.** Різноманітні частотноселективні структури НВЧ використовуються в багатьох галузях електроніки, зокрема для реалізації стільникового зв'язку, для задоволення потреб військової промисловості та освоєння космосу, тощо. Однак розвиток інформаційних технологій вимагає створення нових, більш ефективних конструкцій частотноселективних НВЧ пристроїв, в тому числі і керованих. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї задачі є розробка частотноселективних пристроїв НВЧ з оптичним керуванням. Оптичне керування має ряд переваг: висока завадостійкість, відсутність електричного зв'язку між керованою та керуючою схемами, можливість інтеграції з оптоволоконною лінією передачі, тощо.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» в рамках ініціативної НДР "Керовані частотноселективні пристрої НВЧ на основі відрізків неоднорідних ліній". Номер держреєстрації 0117U006755.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є реалізація частотноселективних НВЧ структур з оптичним керуванням.

Для досягнення цієї мети слід вирішити наступні завдання:

- вибір лінії передачі для створення структури
- моделювання основних параметрів частотноселективної структури
- виготовлення та експериментальне дослідження макетів
- аналіз отриманих результатів

Вирішення цих завдань дасть можливість отримати оптимальну мініатюрну керовану частотноселективну структуру з великим економічним потенціалом.

**Об'єктами дослідження** даної роботи є оптично керовані частотноселективні структури НВЧ на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній.

**Предметом дослідження** є електродинамічні властивості керованих фільтрів НВЧ.

**Методика наукових досліджень** включає: аналіз властивостей мікрохвильових матеріалів, методи вирішення математичних задач на ЕОМ, аналітичне і натурне моделювання.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що досліджено нові способи реалізації керованих частотноселективних структур.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати показали, що спроектовані структури можуть бути використані для реалізації нового класу керованих частотноселективних пристроїв НВЧ.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи представлені X Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2017» та на XXXVIII міжнародній науковій конференції "Електроніка та нанотехнології (ELNANO-2018)"

**Ключові слова:** частотноселективна структура, НВЧ, фільтр, неоднорідність, оптичне керування, мікросмужкова лінія.

## Abstract

**Structure of work:** 92 pages, 33 figures, 31 tables, 22 references.

**Actuality of theme.** Various frequency-selective microwave structures are used in many fields of electronics, in particular for the implementation of cellular communication, to meet the needs of the military industry and the development of space, etc. However, the development of information technology requires the creation of new, more efficient designs of frequency-selective microwave devices, including those that are controlled. One of the promising ways of solving this problem is the development of frequency selective optical microwave devices. Optical control has several advantages: high noise immunity, lack of electrical connection between controlled and control circuits, the ability to integrate with the fiber-optic transmission line, etc.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes.** The work was carried out at the Department of Microelectronics of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" in the framework of the initiative research work "Managed frequency selective devices of microwave based on segments of heterogeneous lines". State registration number 0117U006755.

**The aim and tasks of the study.** The purpose of this work is the implementation of frequency selective microwave structures with optical control.

To achieve this goal, the following tasks should be addressed:

- select a transmission line to create a structure
- simulation of the basic parameters of the frequency-selective structure
- manufacturing and experimental research of models
- analysis of the results

Solving these problems will enable to obtain an optimal miniature controlled frequency-selective structure with great economic potential.

**Objects of research of this work** are optically controlled frequency-selective structures of microwave based on heterogeneous segments of microstrip lines.

**The subject of the study** is the electrodynamic properties of controlled microwave filters.

**The methodology of scientific research** includes: analysis of the properties of microwave materials, methods for solving mathematical problems on a computer, analytical and full-scale simulation.

**The scientific novelty** of the obtained results is that new methods of realization of controlled frequency-selective structures have been investigated.

**The practical value** of the results. The obtained results showed that the designed structures can be used for the implementation of a new class of controlled frequency-selective microwave devices.

**Approbation of the results** of the research. The results of the work are presented at the X International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2017" and at the XXXVIII International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnologies (ELNANO-2018)"

**Keywords:** frequency-selective structure, microwave, filter, heterogeneity, optical control, microstrip line.

## Зміст

ВСТУП .....	10
1. ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ НВЧ .....	12
2. ФІЛЬТРИ НВЧ .....	27
3. МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРАМИ.....	30
4. ОПТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДВОХРЕЗОНАТОРНИМ ФІЛЬТРОМ.....	38
5. СТВОРЕННЯ ПРОВІДНИХ ДІЛЯНОК СМУЖКОВОЇ ЛІНІЇ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ .....	53
6. ОПТИЧНО-КЕРОВАНИЙ ФІЛЬТР НВЧ НА GaAs ПІДКЛАДЦІ .....	67
7. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	71
Висновки .....	89
Список літератури.....	90

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВЧ – високі частоти

ДВЧ - дуже високі частоти

ДНЧ - дуже низькі частоти

ДСТУ – державний стандарт України

ЗФ – загороджувальний фільтр

ІС – інтегральна схема

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

МСР – мікросмужковий резонатор

МСЛ – мікросмужкова лінія

НВЧ – надвисокі частоти

НЧ – низькі частоти

СФ – смуговий фільтр

СЧ – середні частоти

УВЧ - ультра високі частоти

ФВЧ – фільтр верхніх частот

ФНЧ – фільтр нижніх частот

## ВСТУП

В даний час сфера застосування радіоелектронних засобів стає все ширшою, комплекси радіосистем стають більш складними, це повністю відноситься і до техніки НВЧ діапазону. У зв'язку з розширенням можливостей електронної апаратури в багатьох випадках потрібно не тільки випромінювати та приймати НВЧ сигнал, але також виконувати його обробку і перетворення, тому НВЧ схеми ускладнюються і в попередньому виконанні стають громіздкими. Виникає необхідність створення мініатюрних схем, котрі працюють в НВЧ діапазоні. Мініатюризація схемних рішень в електроніці в даний час реалізується за допомогою гібридних плівкових і твердотільних мікросхем. Найбільші успіхи в цьому плані досягнуті в області низьких частот. Однак методи конструювання і технологія виготовлення низькочастотних схем не можуть знайти своє використання в НВЧ діапазоні, так як між цими пристроями в мікровиконанні існує значна кількість відмінностей. До електронних пристроїв НВЧ діапазону висуваються жорсткі вимоги щодо зниження ціни, підвищення надійності, зменшення ваги і габаритів. Сьогодні вага і габарити стали тими чинниками, що обмежують застосування НВЧ пристроїв, а особливо в мобільних установках - на борту водного і наземного транспорту, також на літальних апаратах. Тому використання мініатюризації елементів і вузлів на НВЧ в сучасній електроніці є актуальним завданням.

Особливу увагу слід приділити частотноселективним структурам НВЧ. Різноманітні фільтри використовуються в багатьох галузях електроніки, зокрема для реалізації стільникового зв'язку, для задоволення потреб військової промисловості та освоєння космосу, тощо. Станом на сьогодні некеровані частотноселективні структури освоєні на доволі високому рівні, проте керовані структури можуть знайти своє застосування, зокрема при незначній зміні частоти передачі сигналу. Значні результати в цьому напрямку представлені в роботі [16]. Автори розробили систему електромеханічного керування фільтром, проте



габарити даних пристроїв є неприпустимо великими. Тому основним завданням даної роботи є дослідження можливості реалізації керування частотноселективною НВЧ структурою іншим способом. Для досягнення цієї мети слід вирішити наступні завдання:

- вибір лінії передачі для створення структури
- аналіз можливих методів керування структурою
- розрахунок основних параметрів частотноселективної структури
- виготовлення макету
- проведення експериментальних досліджень
- аналіз отриманих результатів

Вирішення цих завдань дасть можливість отримати оптимальну мініатюрну керовану частотноселективну структуру з великим економічним потенціалом.

## 1. ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ НВЧ

Вивчення й технічне освоєння все нових, більш короткохвильових діапазонів електромагнітних хвиль є основним напрямком розвитку сучасної електроніки, оскільки збільшення частоти сигналу, що передається призводить до зростання швидкодії. Великі успіхи останнього часу – освоєння короткохвильової частини сантиметрового діапазону, а також міліметрових, субміліметрових та оптичних діапазонів – засвідчують про цікавість розробників до даного напрямку електроніки, і, відповідно, його економічну доцільність. Визначну цікавість представляє освоєння діапазону дуже довгих електромагнітних хвиль. Ці два напрямки представляють собою картину діелектричної цілісності розвитку як електроніки, так і науки в цілому.

Укорочення довжини хвилі пов'язано, як уже було зазначено з необхідністю різкого підвищення швидкості передачі інформації. Відомо, що швидкість передачі сигналу пропорційна смузі частот  $\Delta\omega$  сигналу. Звичайною вимогою до лінії передачі являється малість відношення смуги  $\Delta\omega$  до деякої середньої частоти сигналу :  $\Delta\omega/\omega \ll 1$  . Воно засноване на забезпеченні мінімального впливу дисперсії лінії передачі на сигнал.

Збільшення роздільної здатності радіоастрономічних, радіолокаційних і т.д. систем визначається діаграмою направленості антени, котра пропорційна відношенню  $\lambda/D$ , де  $\lambda$  – це довжина хвилі,  $D$  – значення апертури антени. Цікавим прикладом використання короткохвильового діапазону для передачі великих об'ємів інформації являються опто-волоконні лінії зв'язку. [2] В даний час широко використовують лінії передачі, протяжністю в сотні кілометрів. Втрати складають величину порядку декількох децибел на кілометр. Окрім передачі сигналів на значні відстані, волоконні світлопроводи можуть застосовуватися в системах зв'язку всередині певного об'єкту (виробництво, літаки, кораблі, медична апаратура), впливаючи істотному розширенню пропускної здатності каналу зв'язку, економії металу і багато чому іншому. Іншими прикладами застосування

коротких хвиль є дослідження властивостей речовини, оцінки впливу електромагнітних випромінювань на хід хімічних і біологічних реакцій.[3]

Ще однією тенденцією розвитку електроніки НВЧ є підвищення рівня потужності випромінювання. Цей напрям є добре видимим, хоча і не очевидним. Насправді збільшення дальності ліній передач в зв'язку дійсно вимагає, на перший погляд, неперервного збільшення потужності радіопередавальних пристроїв. Ще в більшій мірі є обґрунтованою необхідність збільшення потужності ліній в промислових апаратах, які є призначеними для високочастотного нагріву, зварки, плавки, сушки, різання. Останнім часом з'являється інформація про надзвичайні програми з космічної енергетики, термоядерного синтезу, в котрих передбачають застосовувати великі потужності НВЧ. В той же час зрозуміло, що якщо відносно малий рівень потужності НВЧ випромінювання не представляє небезпеки або навіть робить корисний вплив на живі організми, то великий рівень потужності випромінювання є шкідливим.[4]

Відповідно до ДСТУ лінією передачі НВЧ є пристрій, що обмежує область розповсюдження електромагнітних коливань і який направляє потік електромагнітної енергії в певному заданому напрямі. Напрямок поширення визначається взаємним розташуванням джерела електромагнітних коливань і навантаження в лінії передачі. Джерелом електромагнітних хвиль може служити, наприклад, генератор, що підключений до лінії передачі, антена для прийому або пристрій для збудження лінії передачі, що відбирає певну частину електромагнітної енергії від іншої лінії передачі або іншого пристрою НВЧ. Роль навантаження лінії передачі може виконувати пристрій, що перетворює електромагнітну енергію: випромінююча (передавальна) антена, входні кола приймача і тому подібне. До НВЧ-пристроїв відносять лінії передачі і перетворювачі НВЧ-енергії, фільтри, відгалужувачі, вентилі і так далі.

Сукупність НВЧ-пристроїв, з'єднаних певним чином, утворює НВЧ тракт. Розрізняють регулярні та нерегулярні лінії передачі. В регулярній лінії передачі у подовжньому напрямі сталі поперечний перетин і електромагнітні властивості

середовищ, що заповнюють лінію. Якщо хоча б одна з таких умов регулярності відсутня, то ця лінія передачі є нерегулярною. Лінія, заповнена однорідним середовищем, називається однорідною. Якщо ні – неоднорідною. Лінії передачі класифікуються за діапазонами частот. Прийнята і закріплена термінологія (табл. 1.1), яка визначає довжини хвиль і частоти електромагнітних коливань. Приведена термінологія є обмеженою певним діапазоном частот (від 3 кГц до 300 ГГц). Така класифікація зумовлена особливостями поширення електромагнітних хвиль в різних діапазонах частот. В таблиці. 1.1 діапазону НВЧ відповідають сантиметрові хвилі. Проте на практиці саме цим терміном визначають діапазон із значно ширшими кордонами, який включає різні хвилі від метрових до міліметрових. Лінії передачі класифікуються за типом використовуваних електромагнітних хвиль:

- лінії передачі з поперечною електромагнітною хвилею (Т-хвилею);
- лінії передачі з магнітною хвилею (Н хвилею);
- лінії передачі з електричною хвилею (Е хвилею);
- лінії передачі з гібридною хвилею.[5]

Таблиця 1.1

**Частотні діапазони електромагнітних хвиль [6]**

Довжина хвилі	Термін	Частота	Термін
100...10 км	Міріаметрові хвилі	3...30кГц	Дуже низькі частоти (ДНЧ)
10...1 км	Кілометрові хвилі	30...300 кГц	Низькі частоти (НЧ)
1000...100 м	Гектометрові хвилі	300...3000 кГц	Середні частоти (СЧ)
100...10 м	Декаметрові хвилі	3...30 МГц	Високі частоти (ВЧ)
10...1 м	Метрові хвилі	30...300 МГц	Дуже високі частоти (ДВЧ)
100...10 см	Дециметрові хвилі	300...3000 МГц	Ультра високі частоти (УВЧ)
10...1 см	Сантиметрові хвилі	3...30 ГГц	Надвисокі частоти (НВЧ)
10...1 мм	Сантиметрові хвилі	30...300 ГГц	Вкрай високі частоти (НВЧ)

Якщо направити вісь  $z$  прямокутної системи координат вздовж лінії передачі кожного із цих типів хвилі, можна визначити умови, представлені в табл. 1.2 і що накладаються на подовжні  $H_z$  і  $E_z$  складаючі векторів магнітного і електричного полів відповідно.

Таблиця 1.2

**Умови визначення типу електромагнітної хвилі**

Типи хвиль	Умови на поздовжні складові полів
Т-хвилі	$E_z = 0, H_z = 0$
Н-хвилі	$E_z = 0, H_z \neq 0$
Е-хвилі	$E_z \neq 0, H_z = 0$
Гібридні хвилі	$E_z \neq 0, H_z \neq 0$

З табл. 1.2 витікає, що у Т-хвилі вектори напруженості електричного і магнітного полів лежать в площині, перпендикулярній напрямку поширення; у Н хвилі вектор напруженості магнітного поля має поздовжню і поперечну складові, а саме вектор напруженості електричного поля має лише поперечну складову; у Е-хвилі вектор напруженості електричного поля має подовжню і поперечну складові, а вектор напруженості магнітного поля лежить в площині поперечного перетину лінії передачі; у гібридній хвилі вектори напруженості електричного і магнітного полів уже мають і подовжні, і поперечні складові.[3]

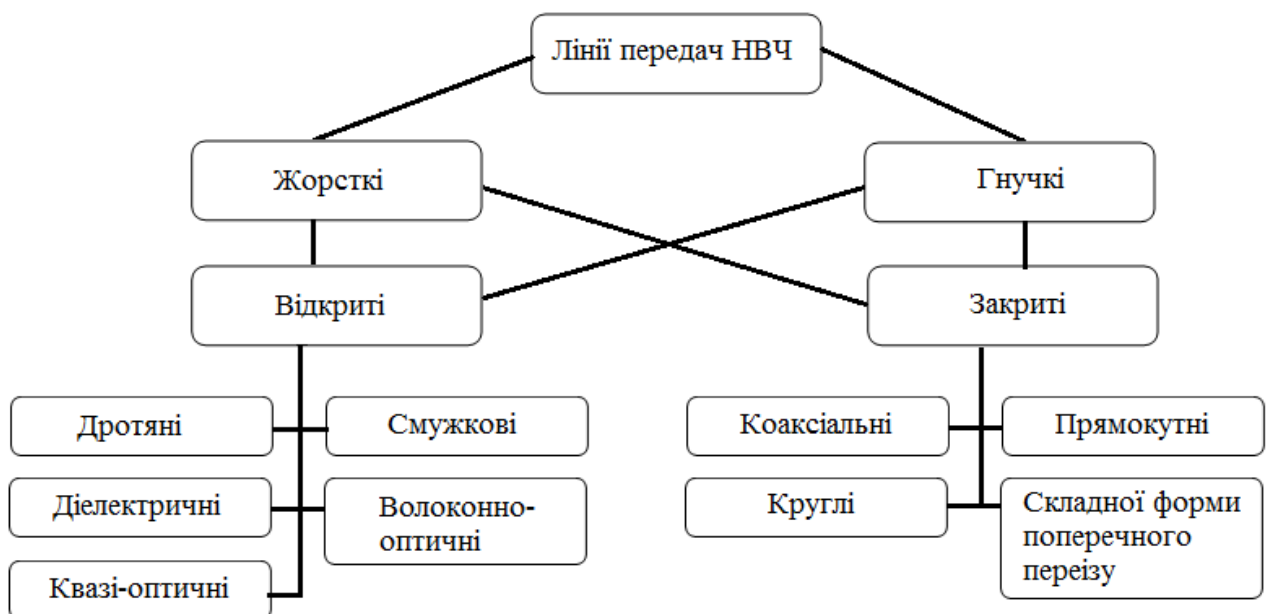


Рис. 1.1. Класифікація ліній передачі

На рис. 1.1 представлена класифікація ліній передачі. Лінія передачі, у якої конструкція не допускає пластичного або пружного вигину, називається жорсткою; якщо допускає, то гнучкою. Хвилеводом називається та лінія передачі, що має одну чи декілька провідних поверхонь, із поперечним перетином, що має вигляд замкнутого провідного контуру, який охоплює область розповсюдження електромагнітної енергії. Якщо саме такий провідний контур повністю відсутній, то лінія передачі вже називається відкритою.[2]

До дротяних ліній передачі відноситься дво- і чотирьохдротові лінії передачі. В таких лініях провідники можуть покриватися діелектриком, що найчастіше і роблять. Основним типом хвилі в таких структурах є Т-хвиля. В чотирьохпровідних лініях збуджуються попарно з'єднані провідники, наприклад вертикальні, діагональні або горизонтальні. Такі лінії передачі знайшли своє застосування в діапазонах гектометрових, декаметрових і метрових хвиль. До смужкових ліній передачі відносять несиметричну і симетричну смужкові лінії, щілинну і копланарну лінії. Вони застосовуються в діапазонах дециметрових, сантиметрових і довгохвильовій частині міліметрових хвиль. Основною хвилею несиметричних і симетричних смужкових ліній є Т-хвиля. У копланарній і щілинній лініях основною є Н-хвиля.[7]

Різноманітні параметри характеризують електромагнітну хвилю та лінію її передачі. Далі ми будемо оперувати ними.

Регулярною лінією передачі називають лінію передачі, параметри якої не змінюються вздовж напрямку поширення хвилі.

Основна хвиля – хвиля, що серед усіх частот, які можуть поширюватися у регулярній лінії має найменшу критичну частоту.

Основними хвилями у однозв'язних лініях передачі (хвилеводи, щілинні лінії) є Е або Н – хвилі, у багатозв'язних лініях без втрат з однорідним заповненням (коаксіальні лінії, симетричні смужкові лінії) – ТЕМ – хвиля, у багатозв'язних лініях з неоднорідним заповненням (несиметричні смужкові лінії або мікросмужкові лінії) – квазі – ТЕМ – хвиля. Усі хвилі з більшими критичними частотами є хвилями вищих типів і вважаються небажаними (паразитами). [1]

Е – хвиля (ТМ - хвиля) - хвиля у якої вектор Н, має нульову поздовжню складову. Інші складові векторів Е та Н відмінні від нуля.

Н – хвиля (ТЕ - хвиля) – хвиля у якої вектор Е, має нульову поздовжню складову. Інші складові векторів Е та Н відмінні від нуля.

ТЕМ – хвиля ( Т- хвиля) – хвиля у якої поздовжні складові векторів Е та Н дорівнюють нулю, тобто вектори Е та Н лежать у площині, яка перпендикулярна напрямку поширення хвилі.

Критична частота Т – хвилі дорівнює нулю. Параметри хвилі не залежать від частоти.

Квазі – ТЕМ – хвиля ( квазі – Т - хвиля) – гібридна хвиля, поздовжні складові векторів Е та Н якої набагато переважають поперечні складові. Критична частота квазі – ТЕМ – хвилі дорівнює нулю. Ця хвиля має значну дисперсію, але на низьких частотах вона практично співпадає по параметрам та властивостям з Т – хвилею.

Гібридна хвиля – хвиля, усі складові векторів Е та Н якої відмінні від нуля. В усіх лініях передачі з неоднорідним заповненням поширюються саме гібридні хвилі.[4]

Критична частота –  $f_c$  – яка, у регулярних повністю екранованих лініях без втрат відповідає частоті, на якій стала поширення -  $\gamma$  -дорівнює нулю.

Стала поширення  $\gamma$  - величина, яка характеризує процес поширення хвиль вздовж регулярної лінії і може бути визначена як  $\gamma = \alpha + j\beta$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт згасання,  $\beta$  - фазова стала.

Фазова стала  $\beta$  [1/м ] – величина, що чисельно дорівнює фазовому зсуву, який набуває хвиля при проходженні у регулярній лінії відстані одиничної довжини.

Коефіцієнт згасання  $\alpha$  - [дБ/м] – величина , що обернено пропорційна відстані, яку повинна пройти хвиля вздовж регулярної лінії для того, щоб її амплітуда зменшилася у е разів. [7]



Довжина хвилі у лінії— $\lambda$  -величина, що чисельно дорівнює відстані, яку повинна пройти хвиля вздовж регулярної лінії , щоб її фаза змінилася на  $2\pi$  .

Фазова швидкість -  $v_{ph}$  - [м/с]- швидкість переміщення фронту хвилі (поверхні рівних фаз) вздовж поздовжньої осі з регулярної лінії.

Добротність лінії –  $Q$  – безрозмірна величина, яка дорівнює власній добротності напівхвильового резонатора з відрізком лінії.

Поверхневий опір провідника –  $R_s$  – величина, яка чисельно дорівнює опору, що зустрічає струм у шарі провідника з товщиною  $\Delta$  на частоті  $f=0$ .

Глибина скін-шару  $\Delta$  - відстань, при проходженні якої хвилею напруженість її поля у провіднику зменшується в  $e$  разів.[2]

Гранична потужність лінії  $P_{max}$  - потужність, при передачі якої виникає електричний пробій. Гранична потужність і, таким чином електрична міцність лінії визначаються максимальною напруженістю електричного поля, перевищення якої веде до пробою.

В радіосистемах використовуються різні типи лінії передачі. Вибір конкретного типу лінії визначається призначенням і параметрами радіосистеми, умовами її роботи та вирішуючим чином залежить від використовувачого діапазону довжини хвиль і передавальної потужності. Найбільш розповсюджені типи ліній передачі для різних діапазонів довжин хвиль представлені на рис. 1.2. [5]

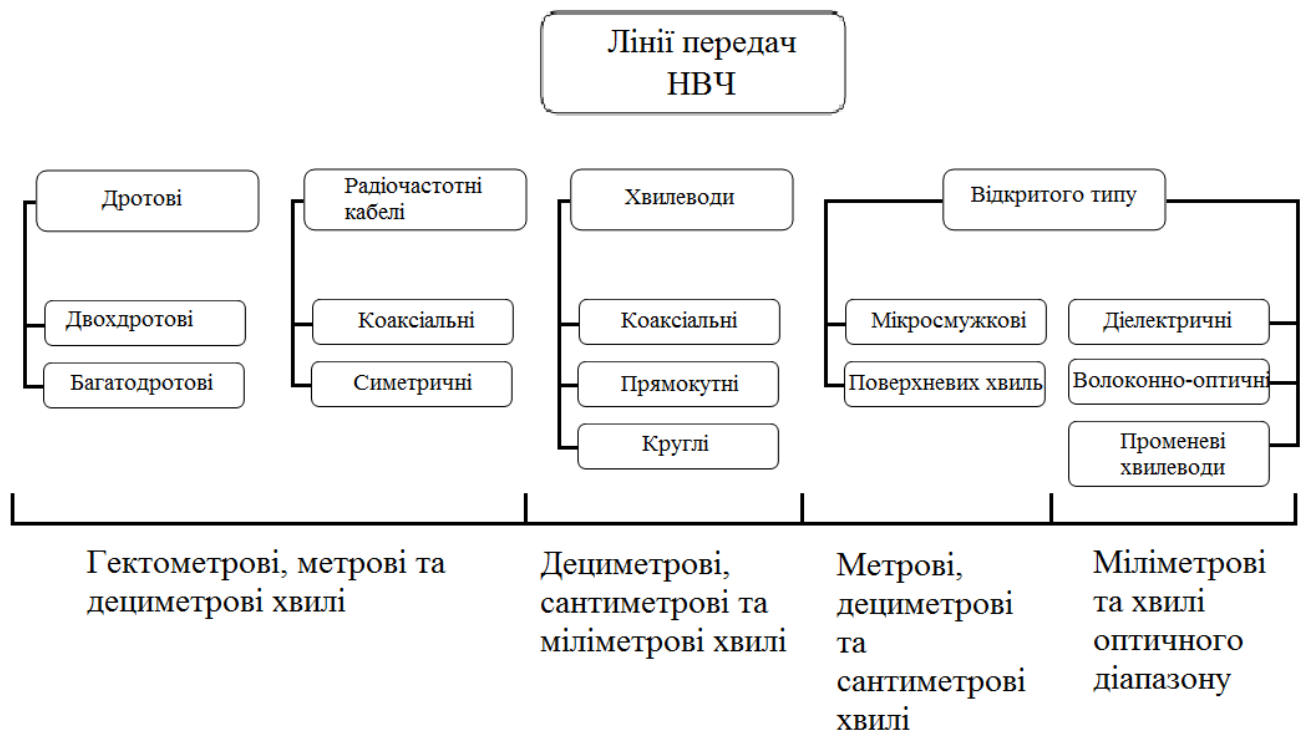


Рис. 1.2. Типи ліній передачі для різних діапазонів[5]

Дротові лінії передачі - відкриті лінії передачі, що складаються з двох однакових паралельних провідників з Т-хвилею, використовуються на гектометрових та метрових хвилях для підключення антен до приймаючих та передавальних приладів. На більш коротких хвилях використанню двох ліній перешкоджає помітне випромінювання, яке створює перешкоди й робить більшим затухання.

Коаксіальні лінії передачі. Область використання таких ліній оплює хвилі довжиною від 3-5 см до 10 м. Коаксіальні хвильоводи являють собою жорсткі конструкції з металевих трубок, закріплених одна в іншій за допомогою діелектричних шайб або металевих ізоляторів, або мають вид гнучких коаксіальних кабелів.

Смужковою лінією передачі називають таку лінію, в якій провідник смужкового перерізу розташований на певній відстані над металічною пластиною або ж розташований між двома металічними пластинами. Простір між провідником та пластиною найчастіше заповнений діелектриком, але може бути заповнений і повітрям.

Розрізняють два основні типи смужкових ліній :

- несиметричні з діелектричним(рис. 1.3а) або повітряним(рис 1.3б) заповненням
- симетричні з діелектричним(рис. 1.3в) або повітряним (рис 1.3г) заповненням

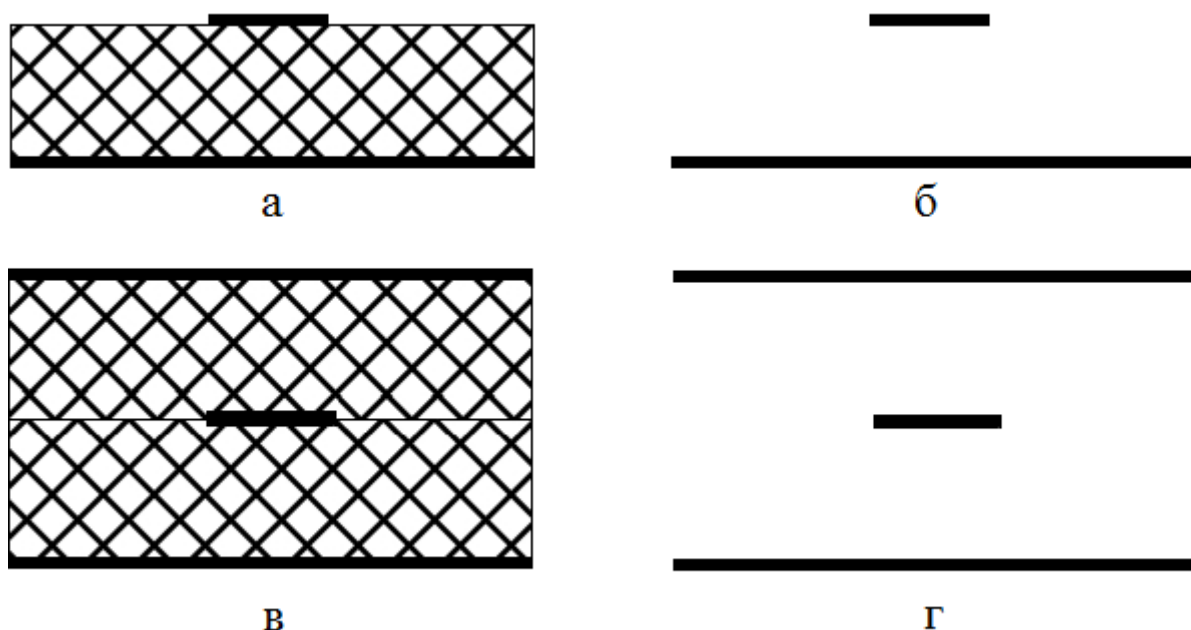


Рис.1.3 Різні типи смужкових ліній.

Несиметрична смужкова лінія (рис. 1.3 а,б) являє собою пластину діелектрика, на одній стороні якої нанесено провідники (провідні смужки) схеми, а на іншій - металізоване покриття, що утворює провідну (заземлену) площину. Така лінія є доволі простою в налаштуванні, виготовленні та експлуатації. В якості діелектричної області можна використовувати діелектрик (рис. 1.3,а) або повітря (рис. 1.3,б). Проте якщо діелектрик має високу діелектричну проникність, то електричне поле концентрується в області між провідником і заземленою пластиною, тому втрати на випромінювання невеликі. Цей факт дозволяє успішно використовувати несиметричні лінії в інтегральних НВЧ схемах, які називають мікросмужковими лініями передачі. Зменшення габаритних розмірів в мікросмужкових інтегральних надвисокочастотних схемах забезпечується за

рахунок вибору діелектрика з високою відносною діелектричною проникністю ( $\epsilon$  порядку 10).

В симетричній смужковій лінії (рис. 1.3 в,г) центральний провідник знаходиться між двома діелектричними пластинами з металізованими зовнішніми поверхнями. Такі лінії мають краще екранування ніж несиметричні, проте вони мають набагато складнішу технологію виготовлення. Вона набагато складніша в налаштуванні, потребують точного узгодження механічної симетрії для забезпечення малих втрат. Центральний провідник симетричної смужкової лінії є абсолютно недоступним для налаштування, що створює певні незручності при налаштуванні схем.

Існує також третій тип смужкової лінії - високодобротна (рис.1.4). Вони застосовуються тоді, коли необхідно щоб добротність ненавантаженої лінії передачі була досить високою (порядка 2000). Високодобротна смужкова лінія має об'єм більший ніж симетрична смужкова лінія передачі, але менший, ніж коаксіальна лінія чи хвилевід. Така лінія забезпечує чудове екранування і менш чутлива до технологічних змін діелектричної проникності чи товщини підкладки. Вибір типу смужкової лінії має проводитись з врахуванням виконання ряду вимог: малі втрати, можливість серійного виробництва, простота налаштування, малі габаритні розміри та вагу, стабільність параметрів, низька вартість.

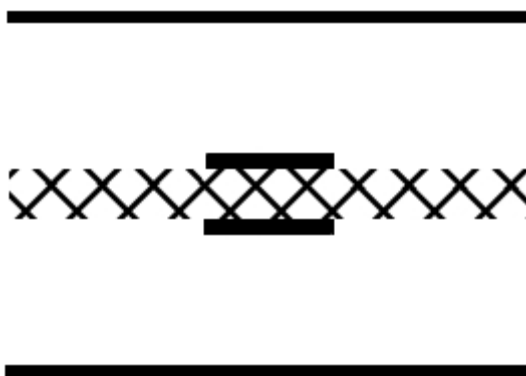


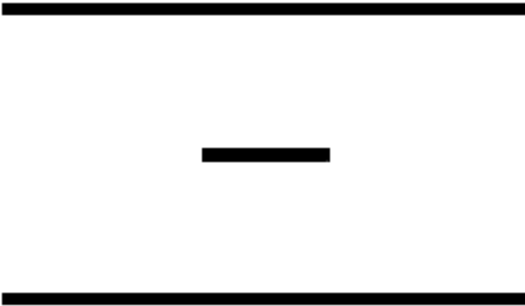


Рис. 1.4. Високодобротна смужкова лінія

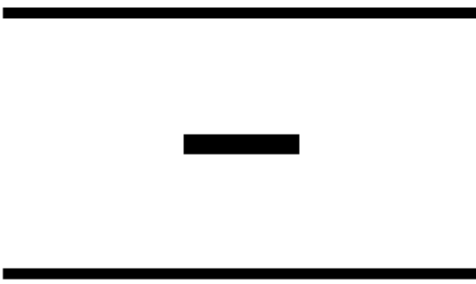
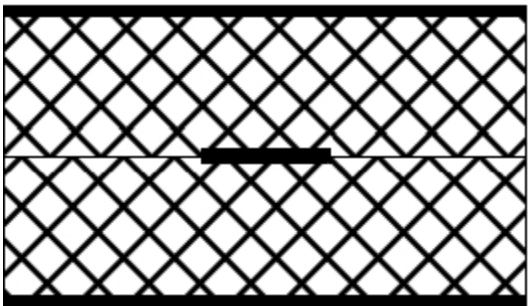
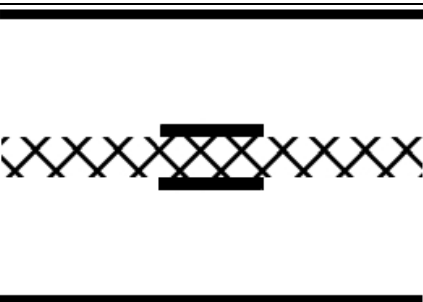
Порівняльна характеристика основних типів мікросмужкових хвиль представлена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

### Порівняльна характеристика смужкових ліній передач

Тип смужкової лінії	Поперечний переріз лінії	Переваги	Недоліки
Несиметрична смужкова лінія з повітряним заповненням		Мала вага	Відсутність екранування, великі втрати, потреба в кріпленні
Несиметрична смужкова лінія (з малим $\varepsilon$ діелектрика порядку 2.. 3 )		Малі габарити, мала вага, низька вартість, не потребує кріплень	Великі втрати в несиметричній лінії, відсутність екранування
Мікросмужкова лінія (з високим $\varepsilon$ діелектрика порядку 10)			
Симетрична смужкова лінія з повітряним заповненням		Малі втрати, мала вага	Великі габарити, потребує кріплень

Продовж. табл. 1.3

Потужна симетрична смужкова лінія		Велика гранична потужність	Великі габарити, висока вартість, потребує кріплень
Симетрична смужкова лінія з діелектричним заповненням		Малі габарити, не потребує кріплень	Відносно великі втрати, значна вага
Високодобротна смужкова лінія		Малі втрати	Потребує додаткових кріплень, значні габарити

Мікросмужкова лінія (МСЛ) є неоднорідною лінією передачі, так як не всі силові лінії поля між смужковим провідником і заземленою пластиною проходять через підкладку. Тому хвиля, що розповсюджується вздовж мікросмужкової лінії, є «квазі - Т-хвилею». Ефективна діелектрична проникність  $\epsilon_{\text{ef}}$  менше діелектричної проникності підкладки, так як вона враховує поле поза підкладкою. Наочне уявлення про структуру електромагнітного поля в мікросмужковій лінії передачі дає його графічне зображення (Рис. 1.5). [1]

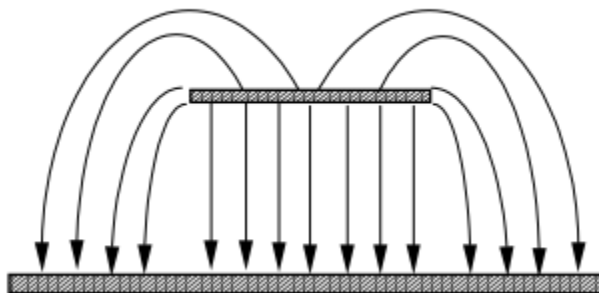


Рис.1.5 Розподіл електричного поля в мікросмужковій лінії

На практиці мікросмужкові схеми розміщують в герметичних корпусах, ізолюючих від зовнішніх електромагнітних полів і від зовнішніх кліматичних впливів. Хвиля основного типу, що розповсюджується в МСЛ, відрізняється від ТЕМ- хвилі наявністю поздовжніх компонент електромагнітного поля, обумовлених несиметричним заповненням лінії діелектриком (неоднорідним діелектричної середовищем). Поздовжні компоненти електромагнітного поля залежать як від параметрів структури (ширини і товщини мікросмужки, висоти і діелектричної проникності підкладки), так і від робочого діапазону частот. Це призводить до залежності власних параметрів МСЛ (хвильового опору, ефективної діелектричної проникності, довжини хвилі в лінії, втрат) від частоти (дисперсії).[4]

Мікросмужкові лінії передачі застосовуються в гібридних і монолітних інтегральних схемах НВЧ діапазону. В гібридних інтегральних схемах різні дискретні компоненти (транзистори, діоди, тощо) заключені в корпусі або модулі мікросмужкової конструкції. В монолітних інтегральних схемах всі елементи схеми реалізуються всередині загальної напівпровідникової пластини і частково на її поверхні. Гібридні схеми в порівнянні з монолітними характеризуються кращими електричними характеристиками, широкою смугою пропускання, малими шумами високою добротністю і стабільністю. Монолітні, в свою чергу, мають нижчу вартість, менші габарити і більш пристосовані до серійного виробництва.

**Висновки по розділу:**

Проаналізовано лінії передач НВЧ сигналу та їх основні параметри. На основі аналізу обрано неоднорідну мікросмужкову лінію через її технологічність, можливість керувати параметрами лінії, змінюючи характер неоднорідності, дешевизну та можливість інтеграції з ІМС.



## 2. ФІЛЬТРИ НВЧ

Фільтром називається лінійний чотириполіусник, призначений для того, щоб виділити із складу складеного електричного коливання, підведеного до його входу, частотні складові, що розташовані в заданій смузі пропускання фільтру, та приглушити частотні складові в заданій смузі (смугах) затримання.

Фільтр характеризується слабким загасанням для сигналів з частотами, що знаходяться в смузі пропускання фільтра (ідеальний фільтр має загасання в смузі пропускання, рівне нулю) і великим загасанням для сигналів з частотами, що знаходяться в смузі затримки фільтра (ідеальний фільтр має нескінченно велике загасання в смузі затримки).

Ідеальний фільтр характеризується тільки смугами пропускання і затримки, тобто різким переходом від загасання, рівного нулю до нескінченно великого загасання. Проте це практично нереально. У реальних фільтрів затухання збільшується поступово від малого в смузі пропускання до великого в смузі затримки.

Фільтри НВЧ розрізняють по взаємному розташуванню смуг пропускання і затримки, виду лінії передачі, що використовується, принципу дії, підлаштовуваності смуг пропускання чи затримки, виду енергії, що використовується, рівню потужності, на якому має працювати фільтр, тощо.

За взаємним розташуванням смуг пропускання і затримки розрізняють наступні типи фільтрів:

- фільтр низьких частот (ФНЧ)
- фільтр високих частот (ФВЧ)
- смуговий фільтр (СФ)
- режекторний фільтр (РФ)

Частотні характеристики таких фільтрів представлено на рис. 2.1

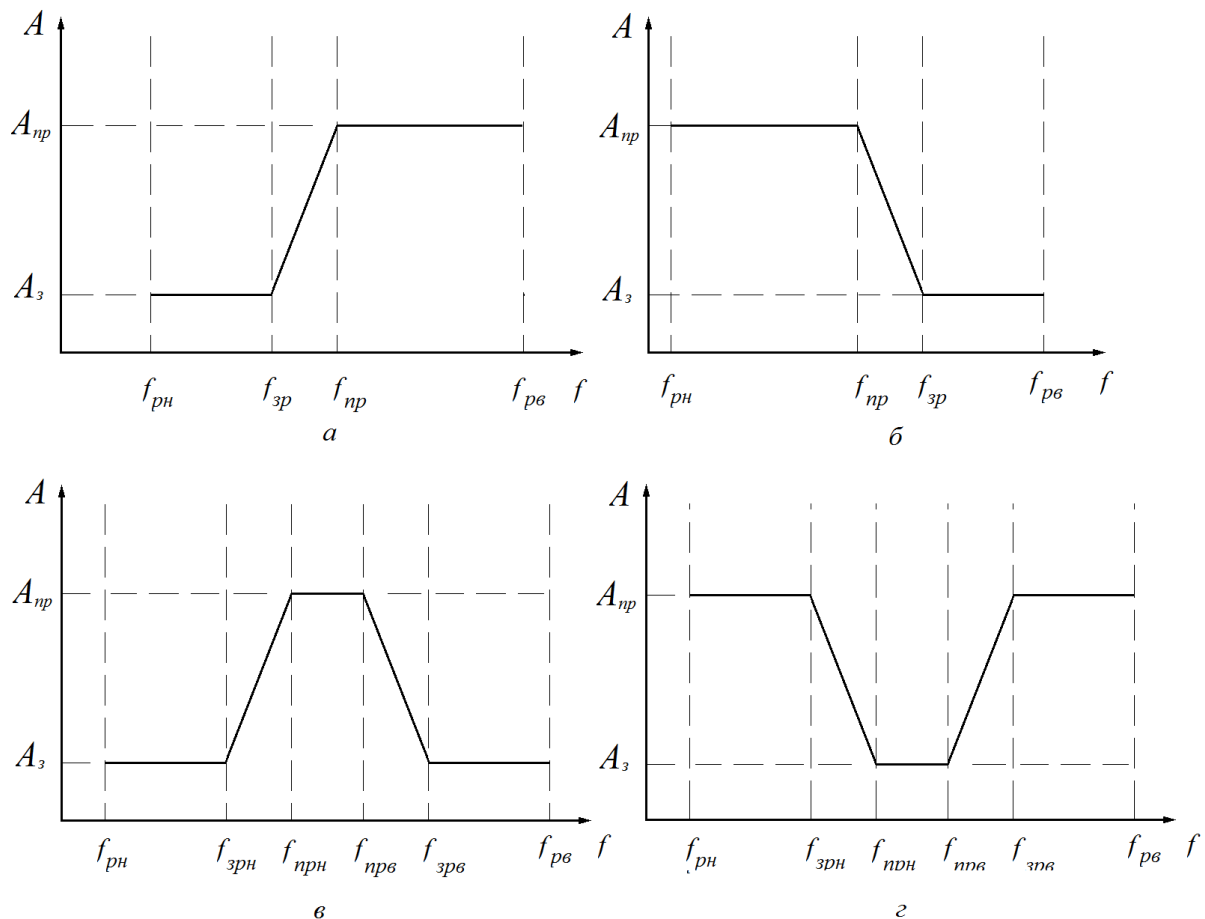


Рис.2.1. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів

За видом надвисокочастотної лінії передачі фільтри поділяються на смужкові, хвиеводні та коаксіальні.

За принципом дії - на відбиваючі та напрямлені.

За можливістю підлаштовування смуг затримки та пропускання фільтри поділяються на підлаштовувані та з фіксованими налаштуваннями.

За видом енергії, що використовується - електромагнітної енергії, енергії спінових хвиль, тощо.

Вибір типу фільтра визначається тими вимогами, які поставлені перед його амплітудно-частотною характеристикою.

Найбільш характерні точки і області частотної характеристики вказано на рис 2.1.

Область між смугою пропускання та затримки називається смугою переходу. Фільтр може характеризуватися шириною смуги переходу чи крутизною наростання смуги пропускання. Частота, що лежить на границі смуги пропускання та перехідної області називається частотою зрізу. Для смугового та режекторного фільтру існує дві частоти зрізу. Частота на границі між смугами переходу та затримки, що визначає початок смуги затримки називається частотою затримки. Для смугового та режекторного фільтру існує дві частоти затримки.

В реальних випадках фільтри використовуються в певному діапазоні частот. Границі цього діапазону називаються верхньою та нижньою робочими частотами. Це обмеження суттєво спрощує задачу розробки фільтра НВЧ, особливо якщо врахувати той факт що у них є певні додаткові, паразитні смуги пропускання і затримки.

Для розробки фільтру зазвичай задаються наступними параметрами чи характеристиками:

- смуга пропускання (або частота (частоти) зрізу фільтру);  
максимальний рівень загасання в смузі пропускання
- смуга (смуги) затримування фільтру. Зазвичай вказуються ділянки, обмежені заданими частотами, в яких рівень загасання повинен бути не менше заданої величини;
- мінімальний рівень загасання в смузі затримування;
- лінія передачі, на якій виконано фільтр
- вага і габарити.

Ці вимоги визначають можливий тип фільтру НВЧ.

### **Висновки по розділу:**

Проаналізовано види фільтрів НВЧ. Розглянуто основні параметри фільтрів. На основі аналізу типових характеристик фільтрів сформульовано вимоги до конструкції неоднорідної частотноселективної структури НВЧ.

### 3. МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРАМИ

Для проектування керованого частотноселективного пристрою слід дотримуватися певних вимог. Ці вимоги задають специфіку використання керованого пристрою. Їх можна сформулювати наступним чином:

- мінімальні та максимальні значення ширини смуги пропускання при перелаштуванні діапазону;
- мінімальні та максимальні значення рівня пульсацій пристрою при перелаштуванні діапазону;
- максимальний рівень втрат в смузі пропускання та мінімальний рівень гарантованого пропускання смуги затримки в діапазоні керування;
- тип апроксимації (за Баттервортом, за Чебишевим, тощо);
- надійність керуючого пристрою, максимальна простота конструкції;
- оптимальні маса та габарити пристрою керування;
- завадостійкість керуючого пристрою;

Проаналізувавши вимоги, зазначені вище, можна дійти висновку, що від того, наскільки складним є пристрій (і від можливостей виробництва) напряму залежить успіх реалізації керованої частотноселективної структури НВЧ. При цьому модернізація існуючих і знаходження більш ефективних способів керування сигналом відіграють надзвичайно важливу роль.

Для реалізації процедури керування параметрами пристрою НВЧ потрібно включити в його структуру певну динамічну неоднорідність. Ця неоднорідність має ефективно впливати на роботу пристрою [10].

Включення, що змінюють діелектричну чи магнітну проникність у напрямку, що є перпендикулярним до ліній електричного чи магнітного поля є найбільш ефективними. Вони можуть бути різними. Це може бути або шар сегнетоелектрика, шар феромагнетика, повітряний зазор змінної товщини, тощо.

Зміна характеристик неоднорідності рівносильна зміні хвильового опору ділянки, яка, в свою чергу, змінює хвильовий опір системи [14].

За принципом дії способи керування можуть мати в основі наступні процеси:

- зміна ємності за рахунок зміни електричного поля;
- зміна діелектричної проникності за рахунок зміни електричного поля;
- зміна діелектричної проникності за рахунок зміни інтенсивності оптичного сигналу;
- зміна магнітної проникності за рахунок зміни магнітного поля;
- комбіновані методи;
- зміна провідності за рахунок зміни електричного поля, магнітного поля чи освітлення;
- зміна ефективної діелектричної проникності за рахунок зміни геометрії структури.

Якщо підключити до коливального контуру напівпровідниковий елемент, ємність якого залежить від зовнішнього електричного поля, то можна реалізувати електричний спосіб керування ємністю[18].

Підключення до контуру нелінійного сегнетоелектрика дозволяє реалізувати метод керування, коли під впливом прикладеного електричного поля змінюється діелектрична проникність системи (рис. 3.1). Системи на основі таких сегнетоелектриків мають певні обмеження за частотою (30...40) ГГц внаслідок значного зростання втрат на вищих частотах [17].

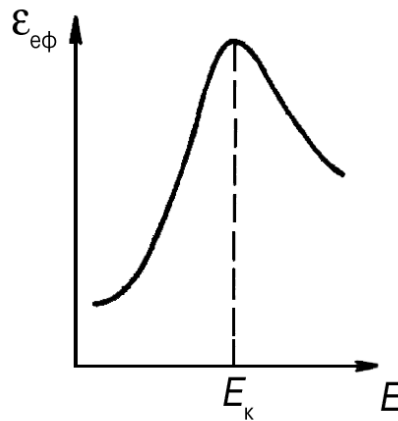


Рис. 3.1. Залежність діелектричної проникності нелінійного сегнетоелектрика від прикладеного зовнішнього електричного поля

Існують і інші способи керування діелектричною проникністю, не лише за допомогою сегнетоелектриків. Наприклад, із застосуванням рідких кристалів. Керування засноване на залежності діелектричної проникності рідких кристалів від прикладеного поля. Недолік такого методу - рідкі кристали мають значні витрати в НВЧ діапазоні.

Застосування світлочутливої кераміки дозволяє змінювати діелектричну проникність під дією світла. Проте в таких матеріалів також високі втрати в НВЧ діапазоні.

Магнітне керування реалізується завдяки залежності частоти феромагнітного резонансу від напруженості магнітного поля. Можливість застосування феритів при НВЧ визначає резонансне поглинання, що виникає в тих випадках, коли на ферит, перемагнічений високочастотним полем, накладене перпендикулярне постійне магнітне поле  $H_0$ . Це поле викликає прецесію орбітального моменту електрона, частота якої  $\omega_e$  змінюється пропорційно  $H_0$ . При визначеній  $H_0$  значення  $\omega_e$  збігається з частотою високочастотного поля, і настає феромагнітний резонанс, що виявляється в зменшенні  $\mu'$  і росту  $\mu''$  у деякому інтервалі поля  $\Delta H_0$  (рис. 3.2).

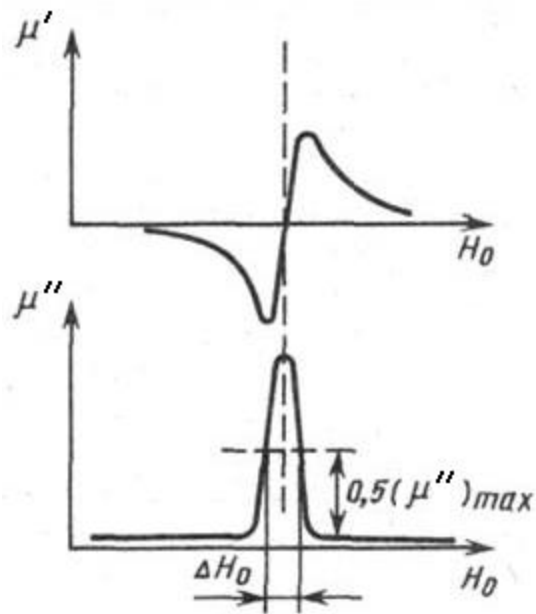


Рис. 3.2. Зміна  $\mu'$  і  $\mu''$  фериту в умовах магнітного резонансу

Ширина інтервалу  $\Delta H_0$  є основною характеристикою феритів НВЧ. Чим менше буде її значення, тим більше значення густини і тим менша кристалографічна анізотропія матеріалу. Щоб одержати такі властивості слід ввести до складу фериту оксид, що має константу анізотропії протилежного знаку. Також, для збільшення густини їх виготовляють методом сплавляння порошків в монокристал, що має мале значення інтервалу  $\Delta H_0$  якщо постійне магнітне поле прикладене в напрямку важкого намагнічування.

Властивості деяких феритів для НВЧ наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

**Властивості феритів для НВЧ**

ферит	$m_q M_s$ , Тл	$q$ , °С	DHq (кА/м) при частоті, МГц	
			9200	3000
1СЧ1	0,20	270	40	-
3СЧ4	0,18	200	15,9	-
6СЧ1	0,13	150	-	10,3
30СЧ1	0,13	170	-	12,7
80СЧ	0,03	120	-	4,8...3,2

Сам ферит для НВЧ вибирають, враховуючи тип пристрою, його частотний діапазон, рівень потужності та кліматичні умови, за яких він буде застосовуватись.

Найсуттєвішим недоліком цього методу є розмір та маса керуючої системи, оскільки потребують наявності електромагніту [13].

Також мають місце комбіновані методи, наприклад одночасне використання електричне та магнітне керування. Таким чином можна збільшити діапазон керування. Проте вони володіють недоліками обох методів, що є базовими [10].

Зміна провідності за рахунок зміни електричного, магнітного поля чи освітлення заснована на залежності електропровідності напівпровідників від різних чинників. Проте ці методи мають недоліки, зокрема зниження добротності та невеликий діапазон [8].

Для керування резонансними частотами систем використовують електромеханічний спосіб управління, який є результативним при використанні методів управління ефективною проникністю системи змінюючи її геометрію шляхом взаємного зсуву частин керованої системи. Тут в якості керуючого



елемента застосовують електромеханічні системи управління на основі п'єзоактюаторів, MEMC систем, тощо.

Перебудову резонансної частоти відрізка мікросмужкової лінії можна здійснювати шляхом зміни його ефективної діелектричної проникності. Для цього в мікросмужкову лінію необхідно внести керовану неоднорідність. Під використання для управління MEMC або п'єзоактюаторів розуміється, що суттєва перебудова частоти резонатора повинна досягатися переміщеннями на десятки-сотні мікрометрів. Тому неоднорідність повинна сильно збуджувати електромагнітне поле. Для цього необхідно, щоб поверхня неоднорідності була перпендикулярна електричному полю, що поширюється в лінії, або його істотній компоненті.

На рис. 3.3 показані два шляхи реалізації такої неоднорідності для мікросмужкової лінії: введення повітряного зазору між сигнальним електродом і діелектриком (рис.3.3, а) або введення такого зазору між діелектричною підкладкою і заземлюючим електродом (рис. 3.3, б).

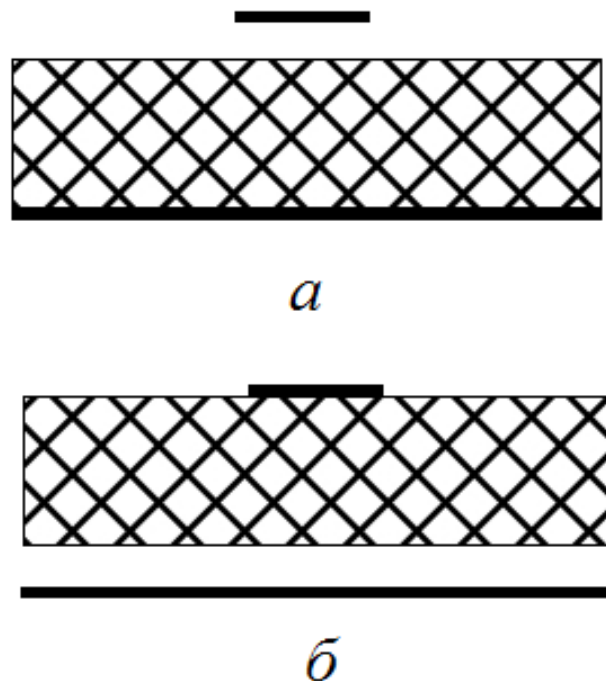


Рис. 3.3. Конструкції мікросмужкових ліній із змінною ефективною діелектричною проникністю: а) з рухомим сигнальним електродом; б) з рухомим електродом заземлення.

На рис. 3.4 показані частотні залежності модуля коефіцієнта передачі смуго-загороджувального фільтра для різних величин повітряного зазору між сигнальним електродом і підкладкою[23]

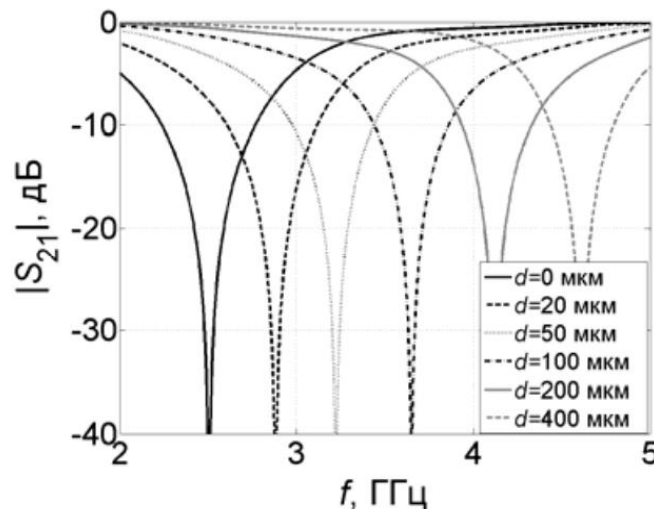


Рис. 3.4 Частотні залежності модуля коефіцієнта передачі смугового фільтра для різних величин повітряного зазору ( $d$ ) між сигнальним електродом і підкладкою[25]

Результати розрахунків даного типу керування свідчать про те, що при помірній товщині підкладки цей метод управління може забезпечити десятки відсотків перебудови частоти відносно малими переміщеннями, які доступні сучасним МЕМС.

Режекторний фільтр має затухання понад 40 дБ на резонансній частоті. Смуговий фільтр на частоті пропускання демонструє загасання сигналу 1-2 дБ[18].

Однак при досить високій точності, та добротності даного методу керування він не підходить для виконання поставленого завдання через громіздкість конструкції та механічну нестійкість.

**Висновки по розділу:**

Розглянуто існуючі методи керування характеристиками частотно селективних пристроїв на основі мікросмужкових ліній. Аналіз показав, що оптичний метод має ряд переваг:

- високу швидкодію;
- відсутність гістерезису;
- відсутність електричного зв'язку між керуючою системою та частотноселективною структурою;

## 4. ОПТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДВОХРЕЗОНАТОРНИМ ФІЛЬТРОМ

В зв'язку з появою на ринку дешевих оптоелектронних приладів, оптично керовані мережі набувають все більшого поширення. Ця ж тенденція стосується і НВЧ приладів.

Переваги оптичного методу керування:

- широкий діапазон підлаштування;
- висока швидкодія;
- завадостійкість до більшості НВЧ завад;
- проста інтеграція з оптоволоконними мережами;
- легкість застосування дешевих оптичних керуючих пристроїв обробки сигналів.

Так як керуючий оптичний сигнал надходить безпосередньо в НВЧ пристрій, не виникає потреби застосовувати кола узгодження чи додаткові компенсуючі та розв'язуючі елементи [14].

Оптично керовані пристрої НВЧ має переваги при застосуванні для:

- комутації НВЧ сигналів;
- регулювання підсилення;
- модуляції та синхронізації генераторів;
- дистанційного керування за допомогою оптоволоконних ліній;
- збільшення пропускної здатності мереж зв'язку [13].

При розробці керуючого напівпровідникового елемента слід враховувати такі типи явищ:

- ударна іонізація;
- контактна інжекція;
- фотоінжекція.

Саме ці явища можуть змінювати в напівпровідникових матеріалах їх імпедансні властивості. І тільки на явищі фотоінжекції ґрунтоване оптоелектронне керування пристроями НВЧ.

Для оптичного керування системами НВЧ можна використовувати різні елементи, як із зосередженими, так і розподіленими параметрами. Для керування в системах НВЧ використовуються такі напівпровідникові елементи, як біполярні фототранзистори, польові транзистори з бар'єром Шоткі, фотодіоди, мікросмужкові лінії на напівпровідниковій підкладці. Останні можуть бути виконані як на суцільній підкладці, так і у вигляді включення в мікросмужкову лінію [14].

На основі GaAs існує значна кількість р-і-п фотодіодів, які є одними з ключових для НВЧ систем оптоелектронного керування. Можливо реалізувати два типи керування за допомогою фотодіодів: пряме та проміжне. Тип керування, коли оптичний сигнал, що подається на фотодіод, використовується для перетворення сигналу в напругу зміщення, називається проміжним. При цьому напруга зміщення, в свою чергу, керує робочою точкою нелінійного елемента, що призводить до керування НВЧ сигналом. При проміжному керуванні можна окремо проектувати керований блок, без ланцюгів розв'язки і додаткових реактивних елементів, та мережі фотодіода. Включення р-і-п фотодіода у коло зміщення нелінійного елемента НВЧ є одним із варіантів проміжного керування. В якості нелінійного елемента можна використовувати, наприклад, варактор [17].

Існує і інший спосіб реалізації проміжного оптичного керування. Він полягає у використанні р-і-п фотодіода у фотогальванічному режимі. За такого включення зовнішнє джерело живлення не потрібне, так як оптичний сигнал керування напряму перетворюється на напругу зміщення нелінійного елемента [10]. Проте проміжний метод має і свої недоліки. До них відносять неможливість розширити діапазон, а також підвищити швидкодію у порівнянні з традиційним електричним керуванням.

При використанні р-і-п фотодіода вважається більш перспективним саме пряме оптичне керування. Зміна ємності р-п переходу при опромінюванні

фотодіода світлом є основою прямого оптичного керування фільтрами, фазообертачами, НВЧ генераторами [14]. Цей ефект добре видно при великих потужностях освітлення та напругах зміщення, дуже близьких до нуля. У цьому режимі є декілька вимог до р-і-п фотодіода:

- висока добротність;
- мала потужність керуючого оптичного сигналу;
- високий коефіцієнт перекриття по ємності.

Використання р-і-п фотодіода в якості варактора має безліч переваг для оптичного керування НВЧ сигналом, серед яких можна виділити такі, як широкий діапазон перебудови та велика швидкодія [13]. Проте разом зі зростом ємності значно знижується опір фотодіода. Використовувати фотодіод в якості фотоварактора означає знижувати добротність системи.

Коефіцієнт відбиття фотодіода напряду залежить від співвідношення діелектричних проникностей середовищ біля поверхні матеріалу приймача випромінювання, від стану поверхні приймача випромінювання тощо.

Коефіцієнт поглинання залежить від властивостей матеріалу приймача випромінювання і від частоти випромінювання. Різні матеріали мають різну спектральну чутливість (рис. 4.1).

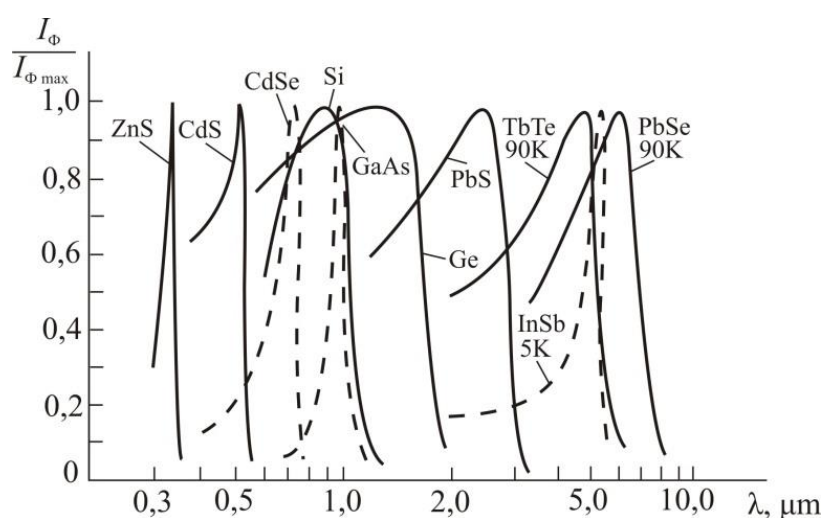


Рис. 4.1. Спектральна чутливість різних напівпровідникових матеріалів [8]

Тому важливим є питання спектрального узгодження джерела та приймача випромінення. Напівпровідникові світлодіоди та лазери є основними елементами освітлення в інтегральній ІМС.

Характеристики деяких матеріалів з помітною фотопровідністю наведено у табл. 4.1.

Характеристики сучасних напівпровідникових світлодіодів наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.1

### Параметри напівпровідникових матеріалів [4]

Матеріал	$\varepsilon(\infty)$	$\Delta E_g, eV$	$\mu_n, \frac{cm^2}{V \cdot s}$	$\mu_p, \frac{cm^2}{V \cdot s}$
CdS	5.23/5.29	2.42-2.5	340	110
CdSe	-----	1.8	720	75
ZnS	-----	3.7	140	5
GaAs	10.86	1.4	9500	450
Ge	15.8-16.5	0.7	3900	1900
Si	11.6	1.12	1400	500
AlAs	-----	2.2	280	-----
GaP	-----	2.3	190	120
SiC	-----	2.4-3.1	330	600

Таблиця 4.2

### Параметри напівпровідникових світлодіодів[12]

Колір випромінення	Довжина хвилі, нм	Напівпровідниковий матеріал
Ультрафіолетовий	$\lambda < 400$	(AlN) (210 nm), (AlGaInN)
Фіолетовий	$400 < \lambda < 450$	(InGaInN)
Блакитний	$450 < \lambda < 500$	(ZnSe), (InGaInN)
Зелений	$500 < \lambda < 570$	Традиційний зелений: (GaP),(AlGaInP),(AlGaP)

Продовж. табл. 4.2

Зелений	$500 < \lambda < 570$	Блідо-зелений: (InGaN) / (GaN)
Жовтий	$570 < \lambda < 590$	(GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Оранжевий	$590 < \lambda < 610$	(GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Червоний	$610 < \lambda < 760$	(AlGaAs), (GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Інфрачервоний	$\lambda > 760$	(GaAs), (AlGaAs)

Характеристики деяких напівпровідникових лазерів наведено у табл. 4.3.

Широко застосовуються в сучасній мікроелектроніці комбінації представлених вище світлодіодів та лазерів з мікропроцесорним керуванням (технологія Chip-On-Board, (COB)). При цьому потрібно оцінити максимально можливу густину розміщення джерел, їх нагрів. Крім того, необхідно врахувати імпульсний характер процесів перемикання джерел світла, оскільки інерційність процесу фотопровідності може приводити до значного спотворення форми інформаційного сигналу.



Таблиця 4.3

### Параметри напівпровідникових лазерів

Тип лазеру	Довжина хвилі, нм	Тип накачки		
		інжекція	електронний промінь	лазерний промінь
GaAs	840	*	*	*
GaSb	1600	*	*	
InP	900	*		
InAs	3100	*	*	
InSb	5200	*	*	*
GaP <sub>x</sub> As <sub>1-x</sub>	650-840	*		
Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As	840-3100	*		
In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	1000-3200	*		
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	600-1000	*		
CdS	500		*	
CdTe	800		*	
PbS	8500	*		

Традиційно в якості коливальних систем використовуються однорідні структури, оскільки, вони мають менші розміри та простіші в реалізації. Але резонансні частоти таких структур залежать лише від часу затримки лінії, а співвідношення між резонансними частотами зовсім не залежить від параметрів структур. Це звужує області їх використання [9].

Резонансні частоти неоднорідних структур залежать від характеру зміни хвильового опору. Це дає додаткові можливості для формування характеристик резонансних систем на їх основі. Наприклад, використовуючи ступінчасті неоднорідності можна розріджувати спектр власних коливань резонансного відрізка лінії [Ошибка! Источник ссылки не найден.0]. Ще однією перевагою таких структур є можливість отримати великий вхідний опір, чого дуже важко добитися при використанні однорідних структур.

Проведені дослідження показали, що на основі неоднорідних систем із ступінчастим характером зміни хвильового опору можливе створення

селективних пристроїв НВЧ з розрідженим спектром. Це спонукало до проведення теоретичних та експериментальних досліджень властивостей резонансних систем на їх основі.

Розглянемо властивості таких систем на прикладі системи на основі короткозамкнених відрізків неоднорідної лінії із ступінчастим характером зміни імпедансу. Для простоти викладення будемо вважати, що даний відрізок має дві області із різним хвильовим опором. Крім того, вважатимемо, що втратами в лінії можна знехтувати. Таку лінію можна зобразити у вигляді кількох відрізків лінії, з'єднаних послідовно рис. 4.2, де  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – хвильові опори області короткого замикання та областей відрізка відповідно [7]. Розрахуємо вхідний опір цього відрізка.

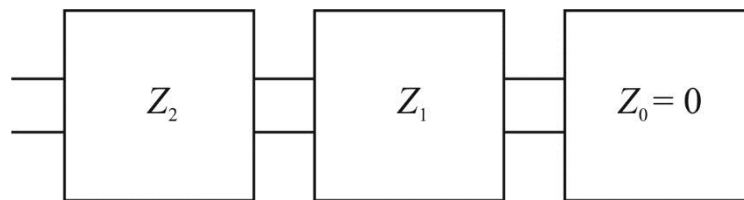


Рис. 4.2. Схематичне зображення відрізка неоднорідної лінії передачі[22]

Побудуємо спрощену аналітичну модель такого відрізка лінії.

Відомо, що опір навантаженого відрізка лінії можна розрахувати за формулою:

$$Z_{in} = Z_w \frac{Z_l + jZ_w \operatorname{tg}(\beta \ell)}{Z_w + jZ_l \operatorname{tg}(\beta \ell)}, \quad (4.1)$$

де  $Z_{in}$  – вхідний хвильовий опір навантаженого відрізка;

$Z_w$  – хвильовий опір відрізка лінії без навантаження;

$Z_l$  – хвильовий опір навантаження;

$\ell$  – довжина відрізка;

$\beta$  - хвильове число.

Відрізок лінії зображений на рис. 4.2 можна розглядати як систему з двох відрізків. При цьому навантаженням першого відрізка є область короткого замикання, а навантаженням другого відрізка є вхідний опір системи перший відрізок-область короткого замикання. Тоді відповідно до (4.1) вхідний опір короткозамкненого неоднорідного відрізка визначається виразом:

$$Z_{in0} = Z_{w2} \frac{j(Z_{w1} \operatorname{tg}(\beta \ell_1) + Z_{w2} \operatorname{tg}(\beta \ell_2))}{Z_{w2} - Z_{w1} \operatorname{tg}(\beta \ell_1) \operatorname{tg}(\beta \ell_2)}, \quad (4.2)$$

де  $Z_{in}$  – вхідний хвильовий опір короткозамкненого неоднорідного відрізка;

$Z_{wi}$  – хвильовий опір  $i$ -ої області відрізка без навантаження;

$\ell_i$  – довжина  $i$ -ої області відрізка.

Для визначення резонансних частот короткозамкненого неоднорідного відрізка скористаємося тим фактом, що на резонансній частоті такий відрізок має характер паралельного контуру, а отже його опір на резонансній частоті теоретично рівний нескінченності. Такий опір може бути забезпечений при умові, що знаменник у (4.2) дорівнює нулю, звідки можна отримати рівняння:

$$Z_{w2} - Z_{w1} \operatorname{tg}(\beta \ell_1) \operatorname{tg}(\beta \ell_2) = 0, \quad (4.3)$$

Розв'язуючи (4.3) обчислюємо хвильові числа даної резонансної системи. Але з електродинаміки відомо:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (4.4)$$

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (4.5)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі у вакуумі;

$c$  - швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі у вакуумі;

$f$  - частота коливань;

$\epsilon$  діелектрична проникність;

$\mu$  - магнітна проникність середовища.

Тоді за допомогою виразів (3-5) обчислюємо резонансні частоти відрізка лінії.

Для експериментального дослідження характеристик таких неоднорідних структур виготовлено зразки резонаторів на основі короткозамкненого неоднорідного відрізка мікросмушкової лінії. Такий вибір було зумовлено тим, що на цій основі можна реалізовувати малогабаритні селективні пристрої НВЧ в широкому діапазоні частот [12]. При цьому вони можуть бути виготовлені за добре відпрацьованою гібридною технологією [10]. Крім того, в таких структурах досить легко забезпечити ступінчасту зміну хвильового опору зразка (рис.4.3) (жирною крапкою позначено місце підключення фотодіоду).

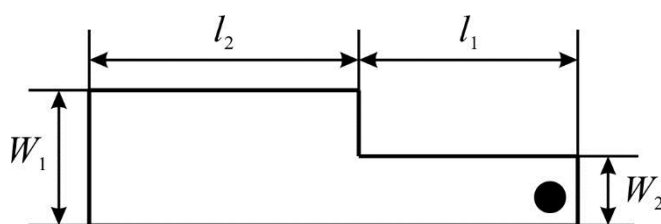


Рис. 4.3. Схематичне зображення резонатора на основі мікросмушкової лінії із ступінчастою неоднорідністю[22]

На основі розглянутих вище неоднорідних селективних структур із ступінчастою зміною імпедансу було реалізовано дворезонаторні фільтри GSM - діапазону [11,**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Схематичне зображення топології дворезонаторного фільтру НВЧ зображено на рис. 4.4. Їх теоретичні та експериментальні АЧХ зображено на рис. 4.5.

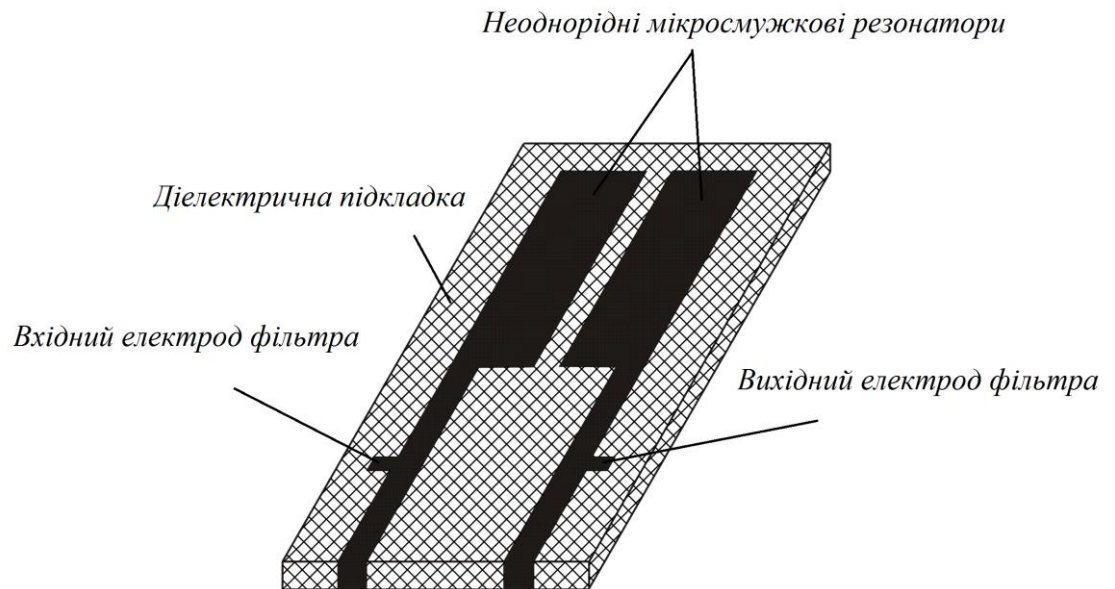


Рис. 4.4. Схематичне зображення топології дворезонаторного фільтра НВЧ на основі мікросмушкової лінії із ступінчастою неоднорідністю [16].

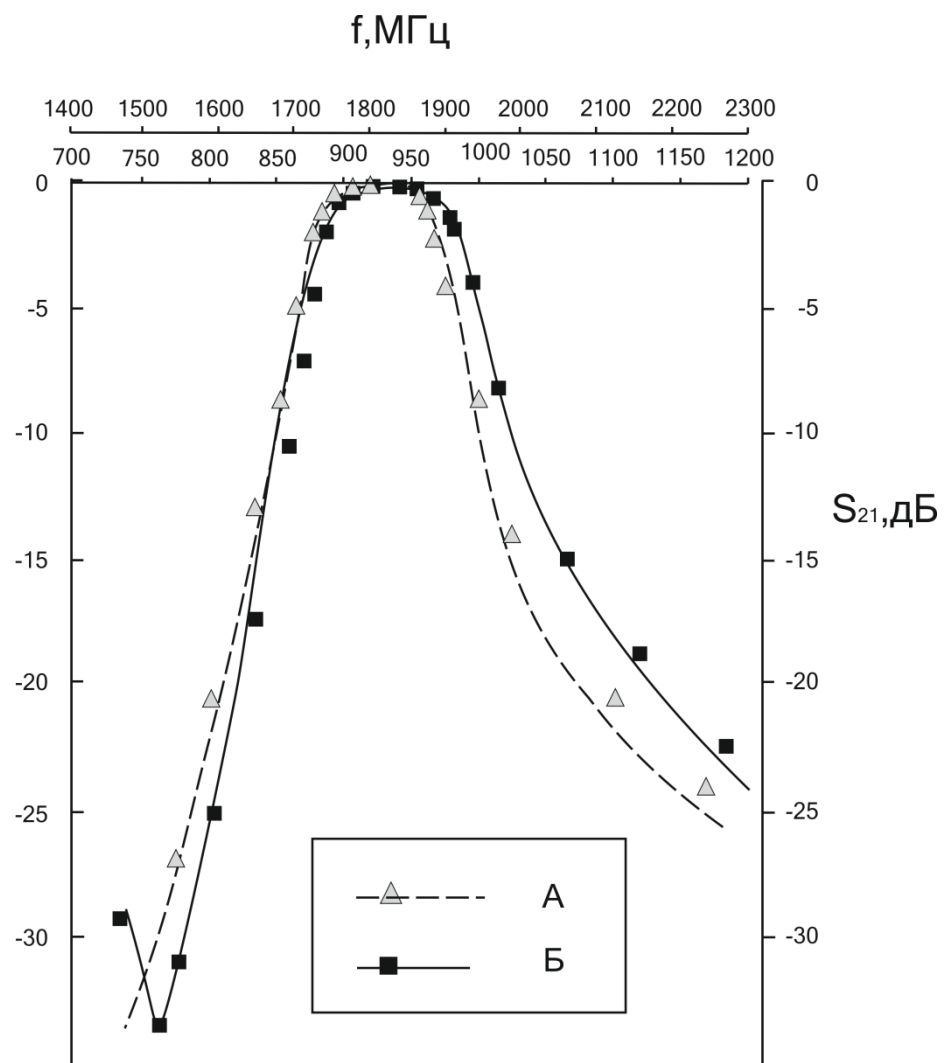


Рис. 4.5. Теоретичні та експериментальні АЧХ дворезонаторних фільтрів на основі мікросмужкової лінії із ступінчастою неоднорідністю на діапазон 900 МГц (А) та 1800 МГц (Б), виготовлених на підкладці з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r=9.6$  і 38 відповідно[16]

Для реалізації оптично керованого фільтра замінимо короткі замикання фотодіодами (рис. 4.6)

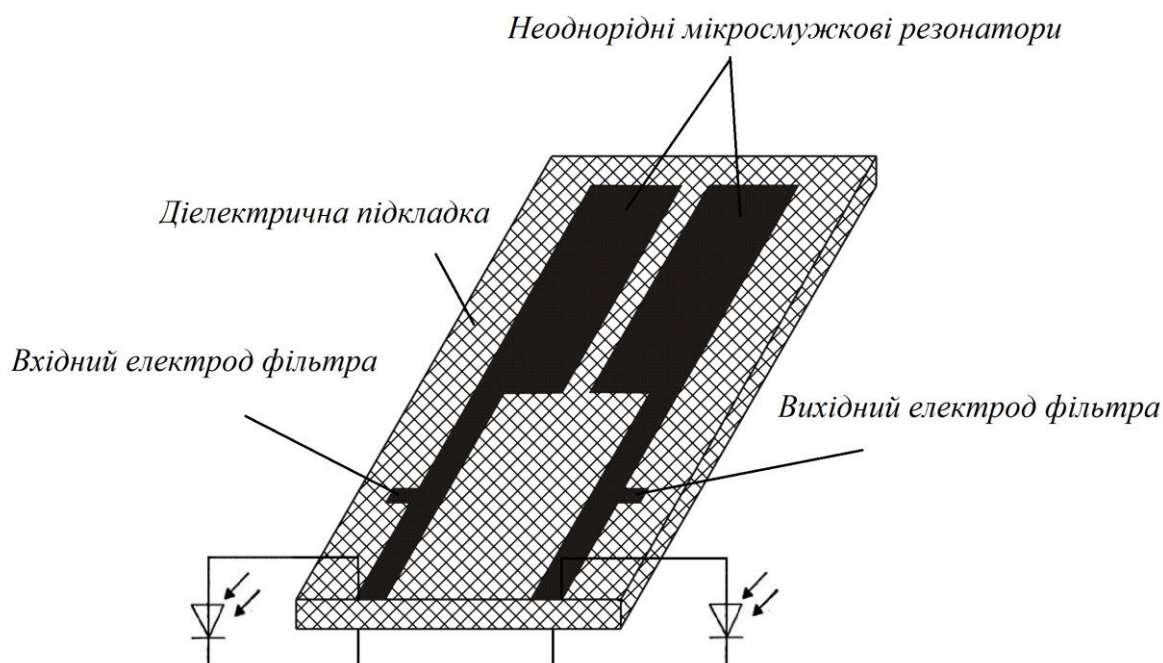


Рис.4.6. Схема підключення фотодіодів.

Для моделювання було обрано GaAs 950 нм р-і-n фотодіод BRW41N виробництва компанії Vishay. Зворотня гілка його ВАХ зображено на рис. 4.7.

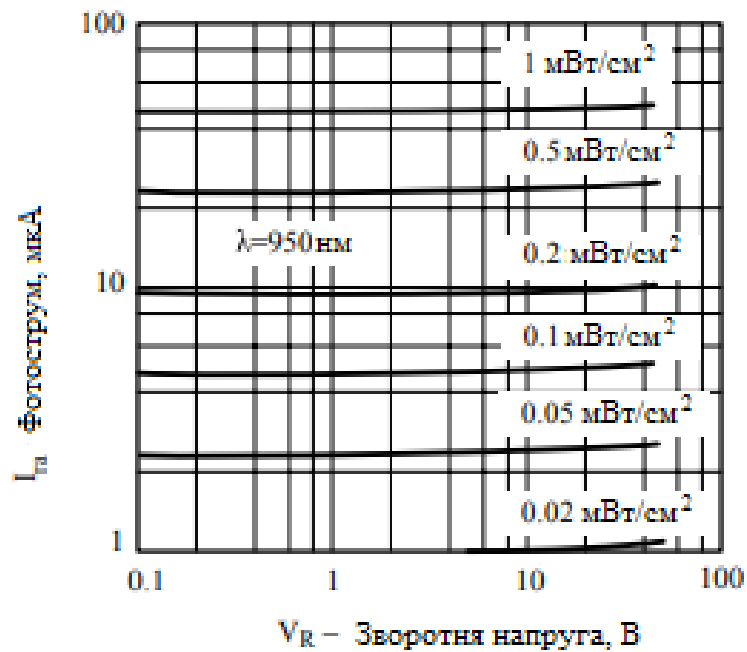


Рис. 4.7. Зворотні гілки ВАХ фотодіода BRW41N [21]

Замінімо фотодіод його еквівалентною схемою (рис. 4.8)

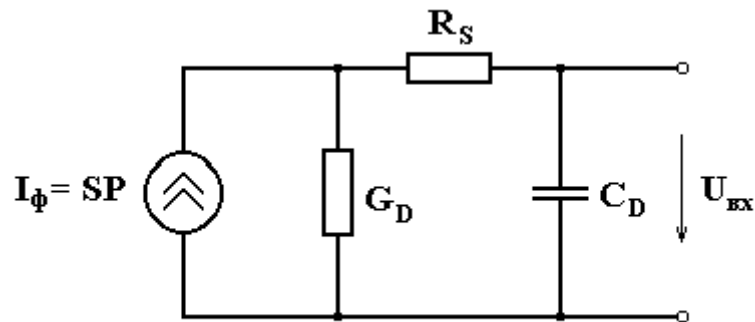


Рис. 4.8. Еквівалентна схема фотодіода

Почнемо з розрахунку та моделювання фільтра для значення освітленості  $1 \text{ мВт/см}^2$ . Із технічної документації фотодіода [21] :

$$C_d = 25 \text{ пФ}$$

$$R_d = 23,8 \text{ Ом}$$

$$R_s = 4 \text{ Ом}$$

$$S = 70 \text{ А/Вт}$$

Необхідно при цьому виконувати умови  $l_1 \approx 0.82l_2$  і  $W_1/W_2 \approx 1/2$  отримані експериментальним шляхом[16]. Для цього завдання вирішується в три етапи.

Задаються габарити фільтру за вказаною вище пропорції, проводиться розрахунок параметрів елементів електричної схеми та проводиться коригування габаритів.

За заданим значенням: центральної частоти  $f_0 = 930 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ , смуги пропускання  $\Delta f = 880 \cdot 10^6 - 980 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ , і  $\varepsilon = 9,8$ , були підібрані геометричні параметри резонаторів і зазор між ними.

$W_1 = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - ширина широкого ділянки.

$W_2 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - ширина вузької ділянки.

$l_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - ширина лінії передачі з опором 50 Ом.

$l_1 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - довжина вузької ділянки.

$l_2 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - довжина вузької ділянки.

$l_3 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - довжина широкого ділянки.

$S = 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - зазор між широкими ділянками резонаторів.

$h_{\text{под}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - товщина підкладки.

В результаті моделювання побудована АЧХ фільтра (Рис. 4.9).



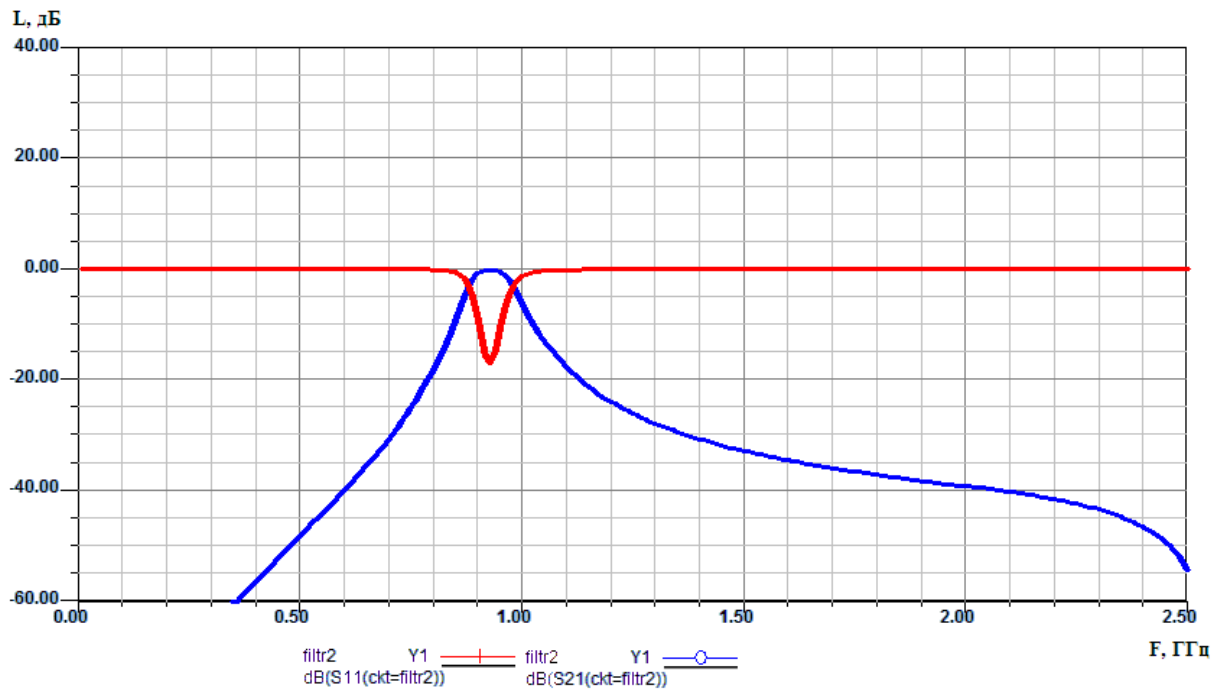


Рис.4.9 Графік теоретичної АЧХ фільтра при потужності випромінювання  $1 \text{ мВт/см}^2$

Отриманні значення центральної частоти  $f_0 \approx 938 \cdot 10^6 \text{ Гц}$  і смуги пропускання  $\Delta f = 883 \cdot 10^6 - 996 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ . Відхилення від даного значення не перевищують 2%, що свідчить про достатню точність заданих геометричних параметрів мікросмушкової структури та параметрів схеми заміщення фотодіода.

Проведемо розрахунок та моделювання фільтра для значення освітленості  $0.05 \text{ мВт/см}^2$ . Із технічної документації фотодіода [21] :

$$C_d = 70 \text{ пФ}$$

$$R_d = 83,4 \text{ Ом}$$

$$R_s = 4 \text{ Ом}$$

$$S = 70 \text{ А/Вт}$$

Проведемо моделювання АЧХ фільтра (рис.4.10).

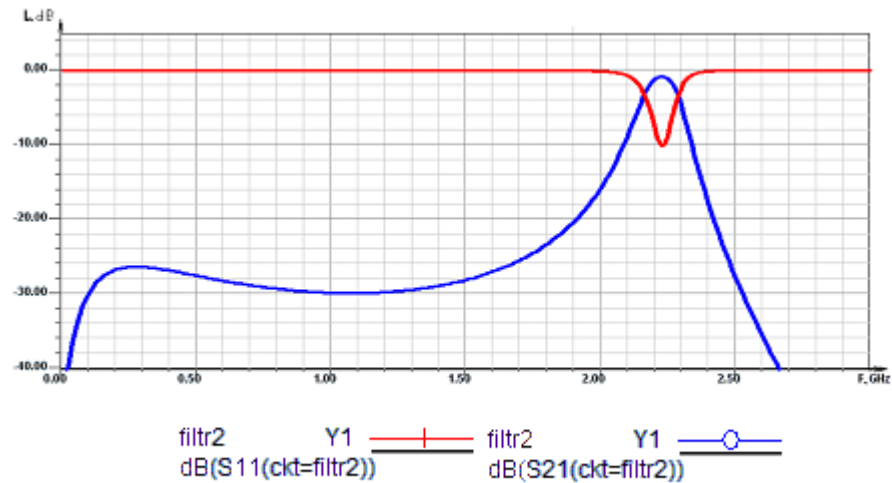


Рис.4.10 Графік теоретичної АЧХ фільтра при потужності випромінювання  $50 \text{ мкВт/см}^2$

### Висновки по розділу:

Запропоновано конструкцію двохдіапазонного мікросмужкового фільтра НВЧ з дискретним перемиканням діапазонів за допомогою р-і-п фотодіодів. Проведено моделювання характеристик фільтра. Частота діапазонів відрізняється в 2 рази, що досягається за рахунок зміни характеру резонансу з півхвильового при неосвітленому фотодіоди на чвертьхвильовий при освітленому. Використання неоднорідних резонаторів дало змогу позбутися паразитних частотних складових до четвертої гармоніки включно. Перемикання діапазонів здійснювалось зі збереженням форми АЧХ.

## 5. СТВОРЕННЯ ПРОВІДНИХ ДІЛЯНОК СМУЖКОВОЇ ЛІНІЇ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ

Відомо, що будь-який сегмент провідної лінії має власний комплексний імпеданс ( $Z_l$ ). Цей імпеданс може бути описаний наступним рівнянням:

$$Z_l = \frac{Z_0}{j \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda_l}\right)} = -Z_0 \left( j \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda_l}\right) \right), \quad (5.1)$$

де  $Z_0$  - характеристика лінії,  $l$  - довжина сегмента,  $\lambda_l = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}$ ,  $\lambda = \frac{c}{f}$  - довжина хвилі в лінії,  $\epsilon_{ef}$  - ефективна діелектрична проникність,  $c$  - швидкість світла,  $f$  - частота сигналу.

Таким чином, характер імпедансу залежить від співвідношення довжини сегмента до довжини хвилі в лінії  $\left(\frac{l}{\lambda_l}\right)$ . Така залежність ідеальної лінії в режимі холостого ходу показана на рис. 5.1:

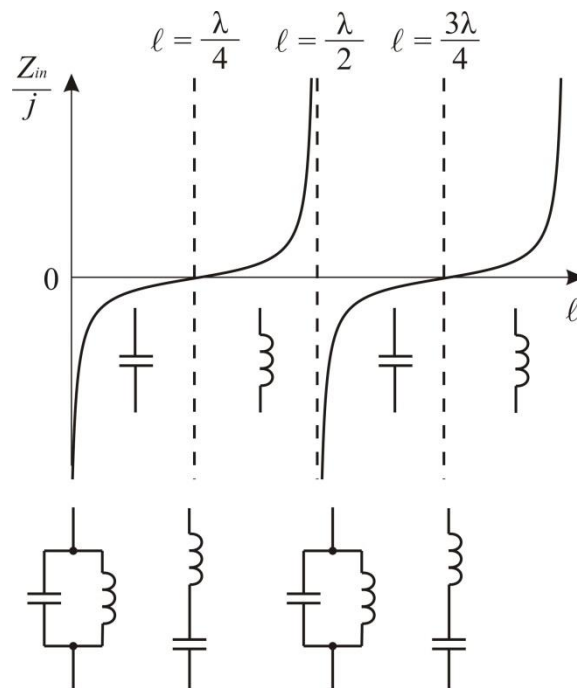


Рис. 5.1. Ідеальна імпедансна лінія сегмента залежно від відношення довжини сегмента до довжини хвилі в режимі холостого ходу.[20]

Подібна залежність також має місце для лінії в режимі короткого замикання. Але цей режим важко використовувати при розв'язанні поставленої задачі, тому не цей режим не буде обговорюватись. Використовуючи цю залежність, можна створити пасивні елементи, а також пасивні схеми, такі як фільтри, лінії затримки тощо.

Найпростіший варіант - це мікросмужкова лінія (рис. 5.2). Заземлення виконується як металізація на зворотній стороні підкладки. Проте конфігурацію стрічки формуватимемо динамічно за допомогою потоку світла.

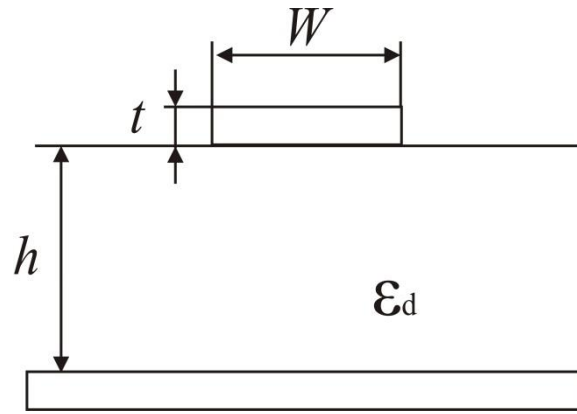


Рис.5.2. Мікросмужкова лінія:  $\epsilon_d$  діелектрична проникність підкладки,  $h$  - товщина підкладки;  $W$  ширина смужки;  $t$  - товщина смужки.[19]

У цьому випадку (в припущенні, що  $t$  є нескінченно малим числом) характеристика лінії може бути розрахована з рівнянь (5.2-5.7):

$$Z_0 = \left( \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \right) \ln \left( \frac{8h}{W} + 0,25 \frac{W}{h} \right), \quad (5.2)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_{d+1}}{2} + \frac{\epsilon_{d-1}}{2} \left( \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right) + 0,041 \left( 1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right), \quad (5.3)$$

$$\frac{W}{h} < 1, \quad (5.4)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \frac{1}{\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W}{h} + 1,4444 \right)}; \quad (5.5)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_{d+1}}{2} + \frac{\epsilon_{d-1}}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}; \quad (5.6)$$

$$\frac{W}{h} \geq 1, \quad (5.7)$$

Неточність розрахунку в цьому випадку становить менше 1%.

Нижче наведені конкретні приклади реактивних елементів.

а) послідовно підключена індуктивність (рис.5.3.)

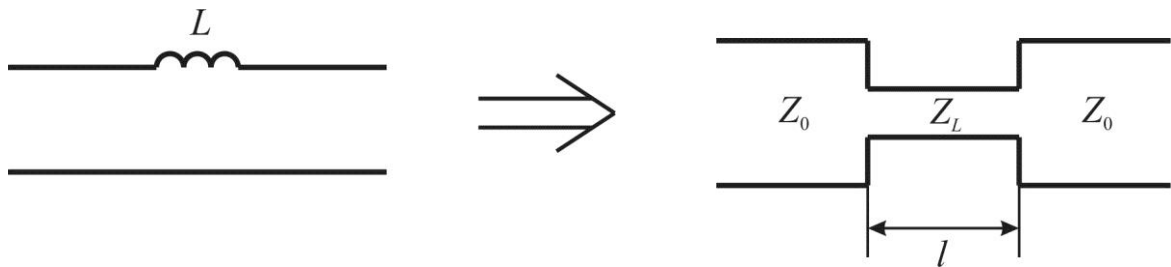


Рис.5.3. Реалізація індуктивного елемента на мікросмужковій лінії.

$$L = \frac{Z_0 l \sqrt{\epsilon_d}}{c}, l \leq \frac{\lambda}{8}, \quad (5.8)$$

б) паралельно підключений конденсатор (рис.5.4)

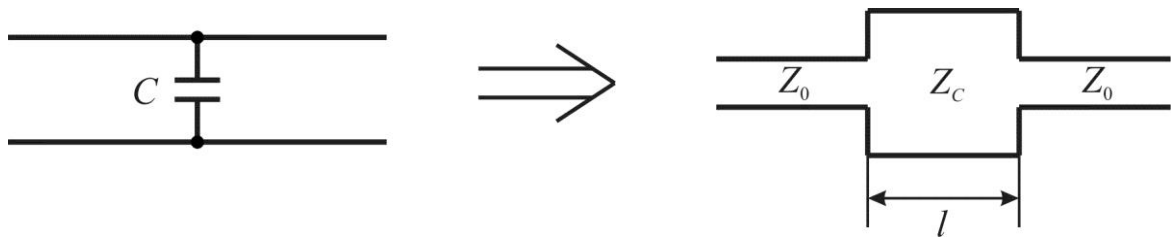


Рис.5.4. Реалізація ємнісного елемента на мікросмужковій лінії.

$$C = \frac{l \sqrt{\epsilon_d}}{Z_0 c}, l \leq \frac{\lambda}{8}, \quad (5.9)$$

в) послідовно підключений конденсатор (рис.5.5)

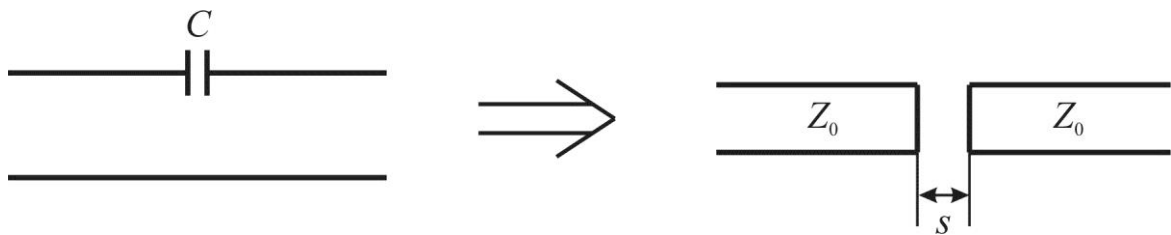


Рис.5.5. Реалізація ємнісного елемента на мікросмужковій лінії.

$$C = \frac{\epsilon_d \pi}{4 \left( \ln(4) + \frac{\pi s}{2h} \right)} W, s \leq \frac{\lambda}{8}, \quad (5.10)$$

г) послідовний коливальний контур, підключений паралельно (рис.5.5)

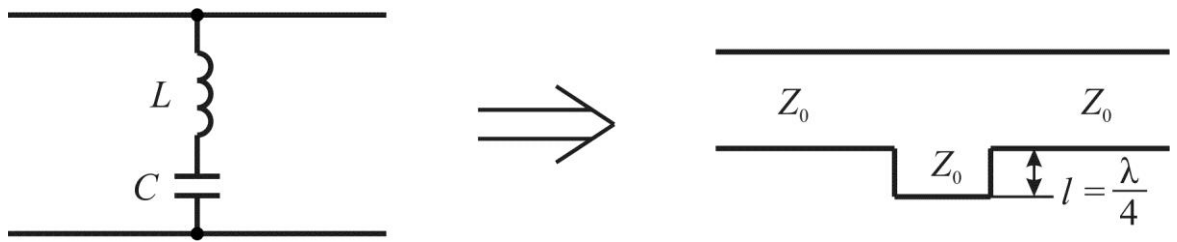


Рис.5.6. Реалізація коливального контура на мікросмужковій лінії.

г) паралельний коливальний контур, підключений паралельно (рис.5.7)

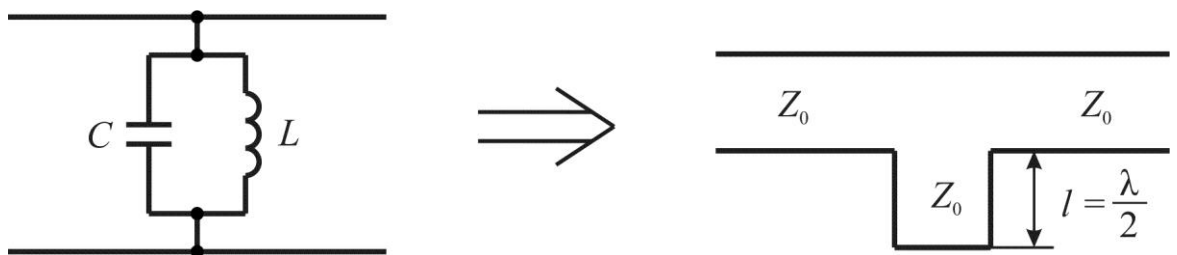


Рис.5.7. Реалізація коливального контура на мікросмужковій лінії.

г) декілька коливальних контурів (рис.5.8)

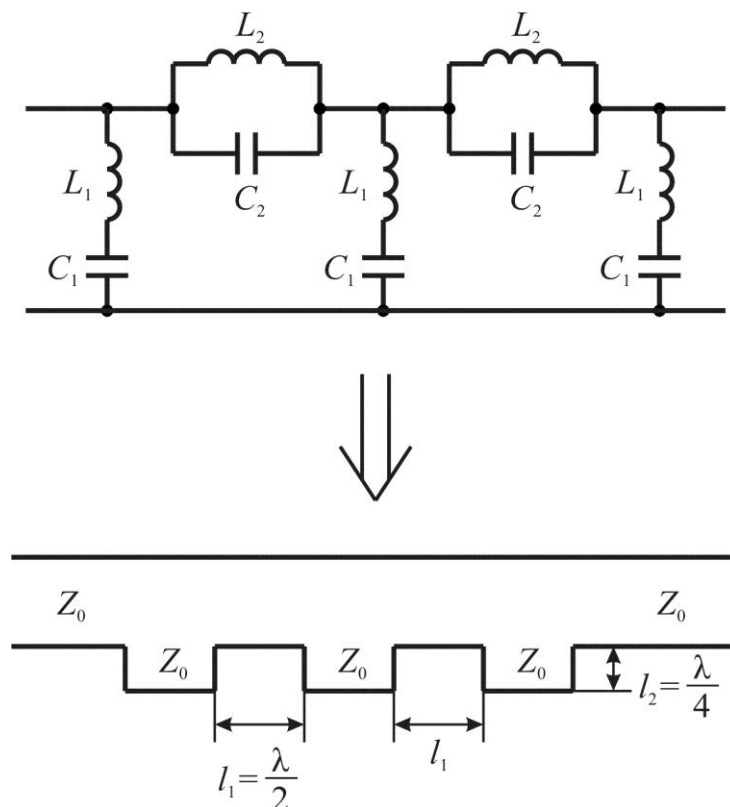


Рис.5.8. Реалізація коливального контура на мікросмужковій лінії.

Ідеальна лінія має тільки реактивний імпеданс (уявна частина комплексного імпедансу). Для реальної лінії необхідно враховувати резистивний імпеданс (реальна частина). Резистивний імпеданс лінійного сегмента може бути розрахований з рівняння:

$$R = \frac{\rho}{t} \frac{l}{W}, \quad (5.11)$$

де  $\rho$  – питома резистентність сегмента електропровідної лінії,  $l$  – це довжина сегмента,  $t$  – товщина сегмента електропровідної лінії,  $W$  – ширина провідного сегмента лінії. Оскільки конфігурація лінії формується динамічно, резистивний опір сегмента в нашому випадку можна розрахувати так:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (5.12)$$

$$\sigma = \alpha \eta \frac{\tau \cdot \Phi_0}{hf}, \quad (5.13)$$

де  $\sigma$  – фотопровідність,  $\Phi_0$  – потік випромінювання від джерела випромінювання,  $\tau$  – коефіцієнт передачі випромінювання системою,  $h$  – константа Планка,  $f$  – частота випромінювання і  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання матеріалу, це квантовий вихід випромінювання.

Розглянемо можливість формування таких провідних ділянок на основі кристалів CdS та CdTe, з огляду на їх перспективні теоретичні параметри та промислову придатність:

- існує 11 прийомів виробництва CdS та CdTe у масових та тонких плівках;
- широкий діапазон розмірів зерна для полікристалів;
- електричний опір 1-1000 Ом \* см, концентрація носіїв заряду  $10^{16}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, рухливість носіїв заряду 0,1-10 см<sup>2</sup> / V \* с, довжина дифузії 100-300 нм. Найкращі плівки CdS мали електричний опір  $10^{-3}$  Ом \* см, рухливість носіїв заряду 150 см<sup>2</sup> / V \* с;
- сильний фотоелектричний опір: 0,001- $10^{11}$  Ом \* см;



- оптично прозорий, найвищий рівень старіння для зеленого світла для CdS та червоний для CdTe;
- багато фотоелементів виготовляються з CdS та CdTe з різними параметрами.

Наприклад, фотоелемент, виготовлений з CdS є елементом з найменшим опором, але час релаксації у нього також дуже високий - аж 5 секунд при освітленні на 21 люкс. І немає шансів знайти фоторезистор з широким спектром фоторезистентності ( $10^3$ - $10^7$  разів) і низьким часом релаксації (фотодіоди і фототранзистори є ще одним класом електронних компонентів - напівпровідників, вони не можуть замінити електричний провідник для реалізації пасивних компонентів, особливо на відстанях, довших ніж перехід p-n).

На підставі таких параметрів можна зробити очевидний висновок про наявність деяких фізичних явищ, які обмежують час реакції фотоелементів (0,001-25 с), робочих частот (типовим значенням ємності фотоелементів є десятки пікофарад, що практично обмежує вихідну частоту до приблизно 100 кГц).

Ідея полягає в тому, щоб створити змінні в часі внутрішні взаємозв'язки між активними та пасивними елементами в електронних структурах з використанням динамічних неоднорідностей. Метою є створення взаємозв'язків між заданими точками (елементами) електронної структури в заданий час для передачі сигналу.

Схема дослідної установки показана на рис. 5.9.

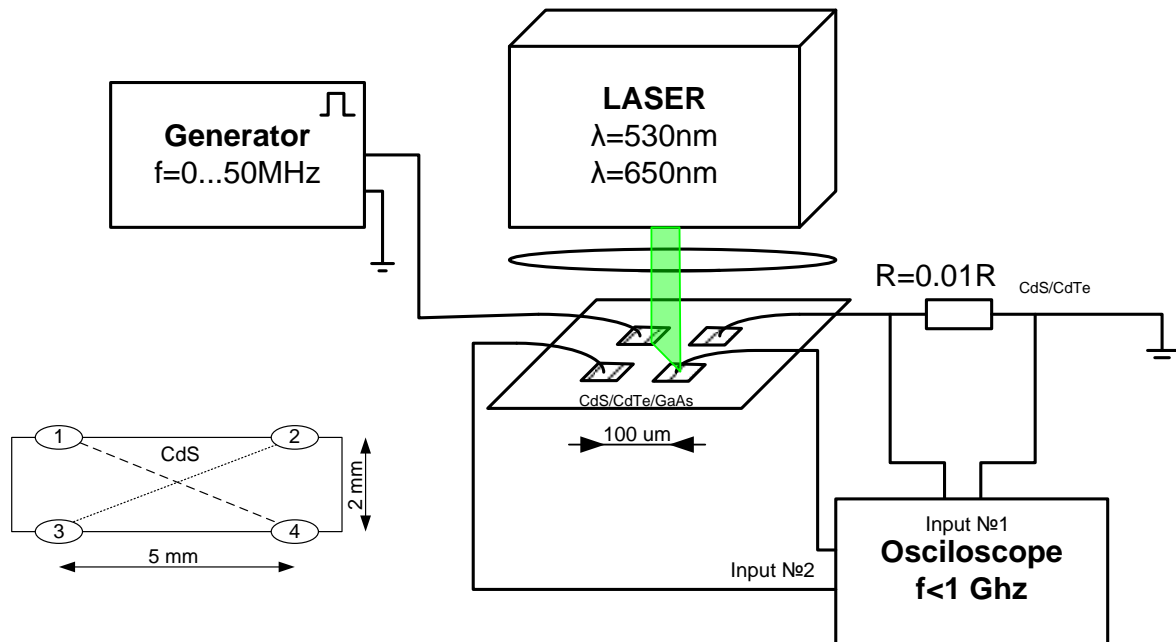


Рис 5.9. Схема дослідної установки

Сигнал з частотою 3 кГц передається від контакту 1 до контакту 4 через фотоіндукований канал полікристалічного CdS. Після часу релаксації сигнал 25 кГц передається від контакту 2 до контакту 3 через фотоіндукований канал того ж полікристалічного CdS. Покази осцилографа зображено на рис. 5.10.

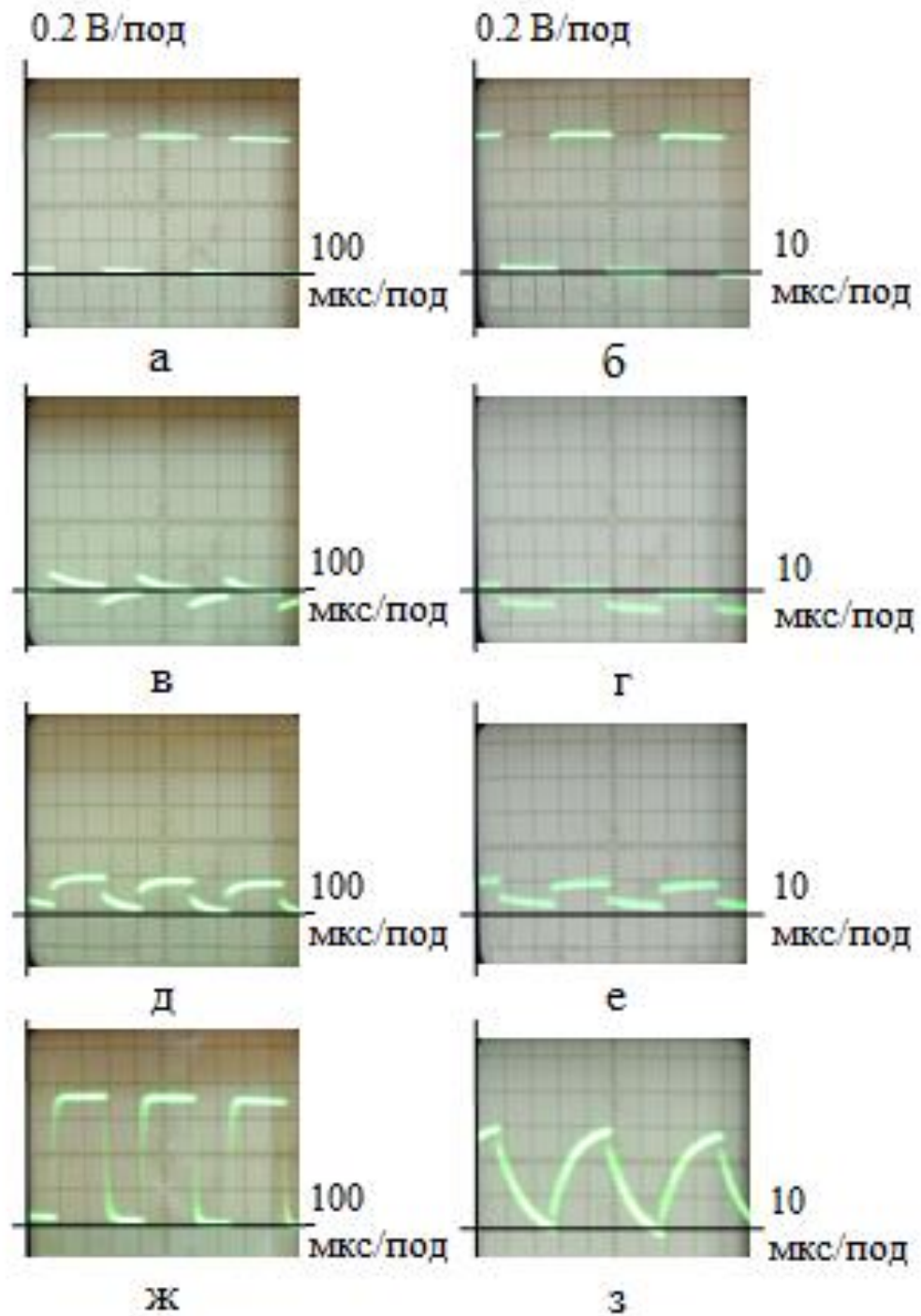


Рис. 5.10. Сигнали, що були зареєстровані на зразках полікристалічного CdS  
а - вхідний сигнал, частота 3кГц, б - вхідний сигнал, частота 25кГц, в,г - шуми в  
затемненій підкладці, д,е - фонові світлові сигнали (з шумовими), ж,з - вихідні  
сигнали

В Технічному Університеті Дрездена було підготовлено 2 зразки CdS та 2 зразки CdTe для подальших випробувань. Схема дослідної установки зображена на рис. 5.11.

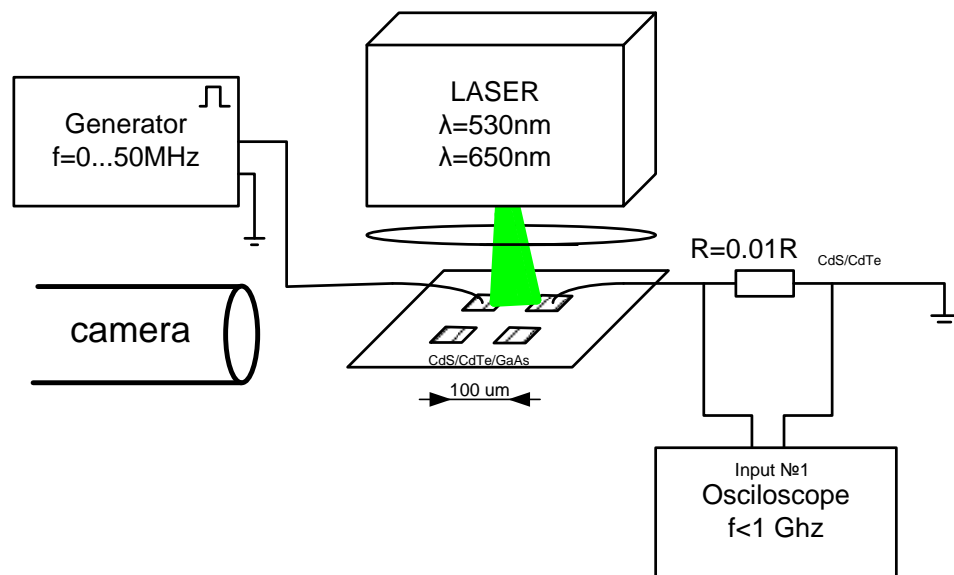


Рис. 5.11. Експериментальна установка для дослідження параметрів кристалів,

$R=25 \text{ кОм}$ ,  $U_G=7,5 \text{ В}$ ,  $P_{\text{laser}}=5.47 \text{ мВт}$

Результати вимірювань зображено на рис. 5.12.

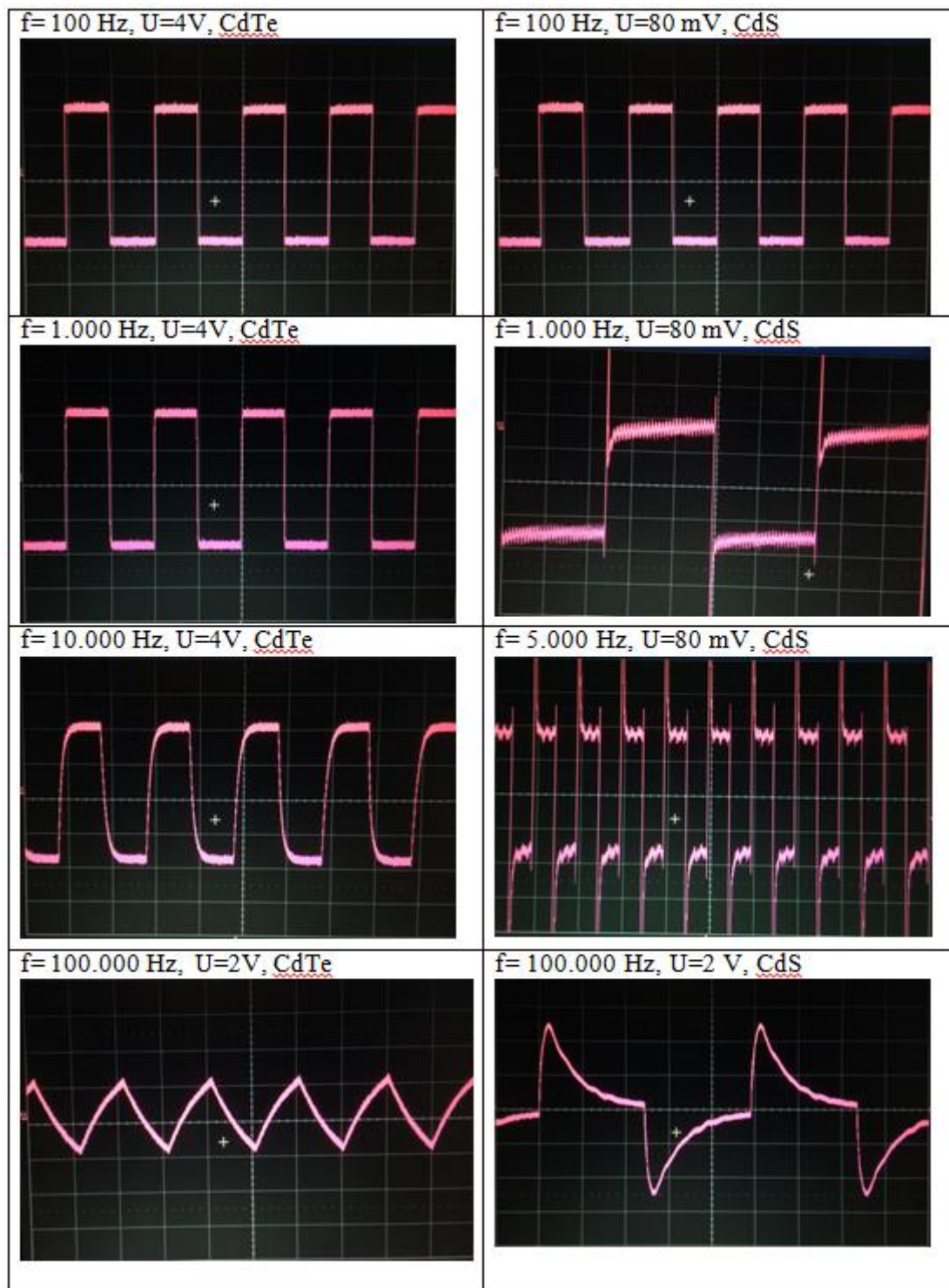


Рис. 5.12. Вихідні сигнали при різних частотах вхідних сигналів.

Це межа промислових фотоелементів. Але перевірка вищих частот показала, що це не межа для полікристалів CdTe / CdS, рис.5.13.

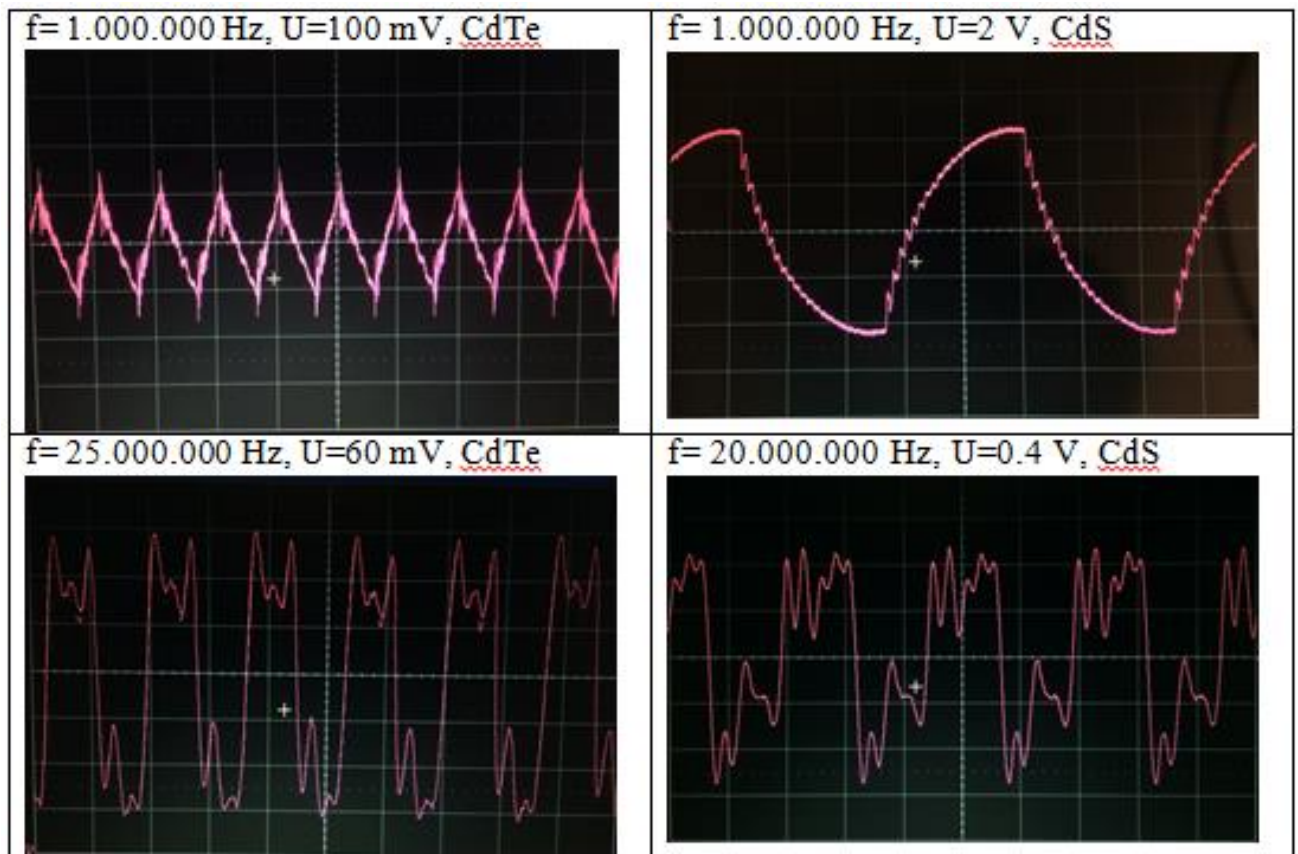


Рис. 5.13. Вихідні сигнали при різних частотах вхідних сигналів.

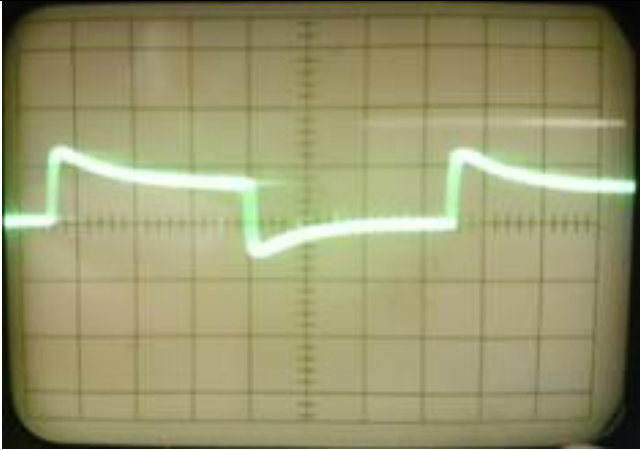
Порівняльна характеристика фотопровідності зразків представлена в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

### Порівняльна характеристика фотопровідності зразків

	<p>1. Режим високоінтенсивного опромінення - сигнали можуть бути отримані та передані без підсилення до 300-500 кГц (в 5 разів швидше, ніж будь-який існуючий фотоелемент), питомий опір - <math>10^4</math> Ом * м (після освітлення) - фотокристали потребують додаткового легування, щоб зменшити цей параметр при необхідності.</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Продовж. табл. 5.1

	<p>Час наростання та спадання менше, ніж 10 мс - у порівнянні з аналогічними фотоелементами, що зроблені це в 100-500 разів швидше при такій само чутливості.</p>
 <p><math>f=100\text{кГц}</math>, CdS/CdTe</p>	<p>2. Режим низькоінтенсивного опромінення - сигнали можна приймати та передавати за допомогою вбудованого підсилювача до 10 МГц (важко правильно порівнювати з будь-яким існуючим фоторезистором), питомий опір <math>10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}</math> (після освітлення), щоб зменшити це, слід додатково легувати кристали або обрати інший матеріал. Час наростання і спадання менший ніж 10 мс - неможливо порівняти з іншими фотоелементами, оскільки потрібен додатковий підсилювач.</p>

**Висновки по розділу:**

Розглянуто метод оптичного створення провідних ділянок на напівпровідниковій підкладці за допомогою когерентного джерела випромінювання. Встановлено, що для полікристалічних фотокристалів CdS гранична частота інформаційного сигналу може сягати 10 МГц, для CdTe - 15 МГц, але необхідно враховувати розмірний ефект. Час наростання та спадання фронтів імпульсів не перевищує 10 мс при зміні питомого опору на 4 порядки. На

більш високих частотах, наприклад, 50 МГц, сигнал зазнає спотворень, що потребує подальшої обробки.

Виходячи з отриманих результатів можна зазначити можливість реалізації провідних ділянок на напівпровідниковій підкладці з допомогою джерела випромінювання, проте для реалізації частотноселективної структури НВЧ цей метод не є доцільним через низьку швидкодію утвореної структури.



## 6. ОПТИЧНО-КЕРОВАНІЙ ФІЛЬТР НВЧ НА GaAs ПІДКЛАДЦІ

Основною задачею експерименту було дослідження можливості оптичного керування параметрами елементу надвисокочастотного тракту без істотного зниження його добротності. У якості об'єкту дослідження обрано відрізок мікросмушкової лінії на підкладці високоомного арсеніду галію.

Вимірювання власної добротності діелектричних резонаторів виготовлених з високоомних Si і GaAs показали високу добротність. Отримані експериментальні результати узгоджуються з літературними даними по цих матеріалах (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Добротності напівпровідникових резонаторів []

Матеріал	$\epsilon_r$	$Q_0$	$F_0(\text{ГГц})$	$\text{ТК}\epsilon \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$
Si	11.9	5000	10	40
GaAs	13.3	5000	10	180

З досліджуваного GaAs виготовлена підкладка 20x10x0.4 мм, на якій сформована мікросмушкова 50-омна лінія. Дослідження виконані за допомогою панорамного вимірювача у діапазоні 3 – 6 ГГц. Резонансна частота 3.43 ГГц,  $3\lambda/4$ . Добротність резонансного відрізка на GaAs складала  $Q_0 = 240$ . На рис. 6.1 схематично показано конструкцію робочого макету, на якому проводились вимірювання.

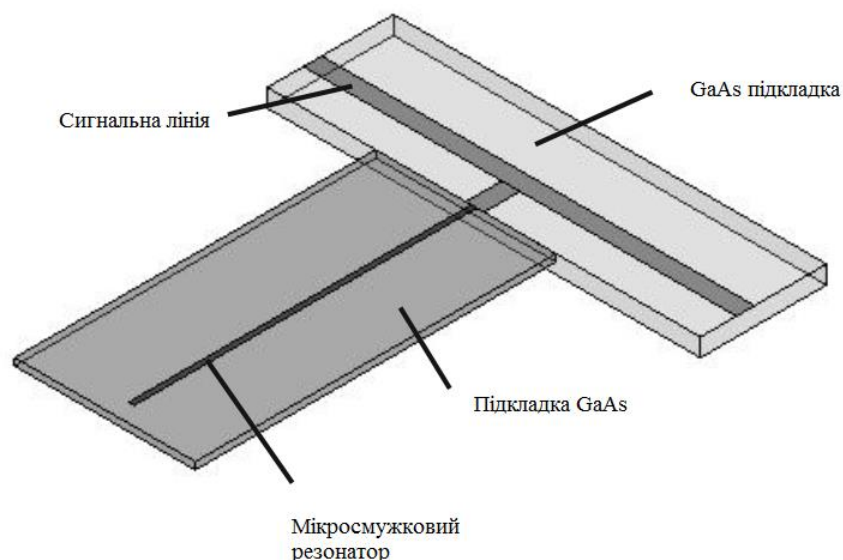


Рис. 6.1. Схематичне зображення конструкції робочого макету мікросмужкової лінії на підкладці з високоомного GaAs[22]

У якості джерела світла в попередніх експериментах використовувались лампи накаливання різної потужності, тобто розглядався варіант засвічування вздовж усієї підкладки, оскільки навіть при використанні фокуруючих систем, ділянка освітлення складала приблизно 2-3 мм. у діаметрі. При освітленні лампами змінного струму постійно присутня модуляція глибиною 3 – 4 дБ як у резонансному режимі, так і у нерезонансному режимі.[14]

При освітленні GaAs підкладки світлодіодом з фокуруючою системою, одержано зміну коефіцієнту передачі від 27 дБ, без освітлення до 21 дБ. При цьому спостерігався 1%-ий зсув резонансної частоти у область нижчих частот.

Для ефективної роботи у ключовому режимі, при послідовному включенні у регулярну мікросмушкову лінію локальної ділянки GaAs, перепад опорів має складати більш ніж два порядки. Оцінити інтенсивність джерела світла, необхідного для виконання означених умов можна за матеріалами роботи [7].

Зміну питомої провідності напівпровідника( $\Delta\sigma$ ) під впливом освітлення можна оцінити за допомогою виразу:

$$\Delta\sigma = e(\mu_n\Delta n_f + \mu_p\Delta p_f), \quad (6.1)$$

де  $e$  – заряд електрону ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);

$\mu_n, \mu_p$  – відповідно рухливості електронів і дірок;

$\Delta n_f, \Delta p_f$  – відповідно зміна концентрації електронів і дірок спричинена освітленням.

Врахувавши, що в об'ємі  $V=SL$  (де  $S$  – площа освітлюваної поверхні зразка, а  $L$  – розмір зразка у напрямі перпендикулярному до освітлюваної площини),

повне число носіїв заряду в елементі ( $N_c$ ) має бути:  $N_c = \Delta n_f V = \frac{L^2}{re\mu_n} \eta$  (де  $\eta$  – квантовий вихід). Тоді поклавши для GaAs зразка:  $L = 0,5$  см;  $\mu_n = 8500$  см<sup>2</sup>/(В·с);  $\eta=0,7$ ; для отримання опору  $r \leq 0,5$  Ом, одержуємо  $N_c \geq 2,57 \cdot 10^{14}$ .

Відповідну інтенсивність освітлення в імпульсному режимі можуть забезпечити різноманітні лазери. Отримані результати, а також результати інших дослідників [15] вказують на можливість формування на поверхні фоточутливого напівпровідника за допомогою світла областей з високою провідністю, що вказує на можливість створення оптичнокерованих планарних структур НВЧ. Використовуючи властивості відрізків ліній НВЧ (рис. 5.1), можна формувати необхідну конфігурацію провідників динамічно в процесі роботи в залежності від потреби [15].

### **Висновки по розділу:**

Показано можливість прямого оптичного керування параметрами планарної лінії на напівпровідниковій підкладці. При освітленні лампами змінного струму постійно присутня модуляція глибиною 3 – 4 дБ як у резонансному режимі, так і у нерезонансному режимі.

При освітленні GaAs підкладки світлодіодом з фокусуючою системою, одержано зміну коефіцієнту передачі від 27 дБ, без освітлення до 21 дБ. При цьому спостерігався 1%-ий зсув резонансної частоти у область нижчих частот.

Одержані попередні результати підтверджують перспективність даного напрямку. Основними проблемами при цьому залишаються низька добротність таких структур та високе енергоспоживання, що вказує на необхідність проведення подальших досліджень.

## 7. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Опис керованого НВЧ фільтру на основі неоднорідних мікросмужкових резонаторів

Таблиця 7.1

### Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка концептуальної нової частотно-селективної структури НВЧ з поліпшеним каналом управління.	1. Термокомпенсація в техніці НВЧ. 2. НВЧ техніка для стільникового та військового зв'язку	Зниження ціни, покращення характеристик.

Таблиця 7.2

### Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	(нейтральна сторона)	(сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
Економічні	125 у.о.	290 у.о.	426 у.о.	160 у.о.	+		

Продовж. табл.7.2

Призначення	НВЧ техніка для стільниково го зв'язку, термоком пенсація в техніці НВЧ	НВЧ техніка для стільниково го зв'язку	НВЧ техніка для стільниково го зв'язку	НВЧ техніка для стільниково го зв'язку		+	
Надійності	Використ ання надійної завадості йкої системи	Використа ння недостатнь о надійних систем з мех.керува нням	Використа ння доволі надійних систем з мех. керування м	Використ ання завадонес тійких систем керуванн я	+		
Технологічні	Проста технологі я, пристрій не потребує підлашту вань	Пристрій потребує подальших підлаштува нь	Пристрій потребує подальших підлаштув ань	Пристрій не потребує подальши х підлашту вань		+	

Продовж. табл. 7.2

Ергономічні	Система компактна, зручна в керуванні та налаштуванні	Система не компактна, зручна в керуванні та налаштуванні	Система не компактна, зручна в керуванні та налаштуванні	Система компактна, зручна в керуванні та налаштуванні		+	
Органолептичні	-	-	-	-		+	
Транспортабельності	Має малі габарити, легко транспортується.	Має значні габарити, але легко транспортується.	Має значні габарити, але легко транспортується.	Має малі габарити, легко транспортується.			
Екологічності	-	-	-	-		+	
Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Не відповідає директиві ROHS		+	

Конкурент 1: Механічно-керована (п'єзоактюатор) частотноселективна структура

Конкурент 2: Механічно-керована (MEMS) частотноселективна структура

Конкурент 3: Електрично-керована частотноселективна структура

Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 7.3

**Технологічна здійсненність ідеї проекту**

п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
.	Технологічність та надійність.	Побудова частотно-селективної структури за планарною технологією.	Наявна	Доступно.
		Надпроста керуюча система - світлодіод.	Наявна	Доступно.
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: планарна технологія				

**Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту**

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту представлена в табл. 7.4.



Таблиця 7.4

**Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту**

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
	Кількість головних гравців, од	3
	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	3257
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	250

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 7.5

**Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту**

п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Термокомпенсація, фільтрування вхідного сигналу.	Стільникові мережі, військові, космічні програми.	Певні клієнти мають над собою жорсткий контроль щодо вартості предмету закупівлі.	Легкість в керуванні, компактність, надійність.

Таблиця 7.6

**Фактори загроз**

п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
.	Кваліфікований персонал	Продукт потребує точності виготовлення, тому технологічний процес має контролювати кваліфікований персонал	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
	Технологічне обладнання	Для створення продукту потрібне сучасне технологічне обладнання що дороге коштує	Залучення інвесторів

Таблиця 7.7

**Фактори можливостей**

п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість	Ускладнення структури та функціональної наповненості товару

Продовж. табл.7.7

.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій	Рекламна діяльність, просування товару на тематичних форумах, в інститутах
---	-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Таблиця 7.8

## Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції  олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються випуском частотно-селективних структур НВЧ	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; офіси розміщено у різних країнах	Залучати дистриб'юторів для продажів в різних країнах

Продовж. табл.7.8

3. За галузевою ознакою  внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Слідкувати за продуктами конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Продавати товар за низькою ціною.
6. За інтенсивністю - марочна	Боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 7.9

**Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером**

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	“JQL Electronics”, “Nowa Microwave”, "MACOM"	Немає	Товар продається дистриб'юторами	Вимоги до якості	Замінників немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока, бо продукт є наукоємким і тому не кожна фірма здатна розробити такий продукт	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним та дешевим	Обмієжень немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та програмування.

Таблиця 7.10

### Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Ступінь задоволення потреб користувача.	Продукт має мати зручний механізм керування.
Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	Продукт має працювати стабільно при помірному зовнішньому тиску, вологості та механічних коливаннях.
Наявність наукових ресурсів	Необхідні кваліфіковані кадри для оптимізації розрахованих даних.
Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців та сформувати імідж фірми.

Таблиця 7.11

### Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
Ступінь задоволення потреб користувача.	15			X				
Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	14			X				
Наявність наукових ресурсів	17					X		

Продовж. табл. 7.11

Економічний (ціна товару)	20	X						
---------------------------	----	---	--	--	--	--	--	--

Таблиця 7.12

**SWOT- аналіз стартап-проекту**

Сильні сторони: економічна (ціна товару).	Слабкі сторони: ступінь задоволення потреб користувача.
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок рекламної діяльності.	Загрози: потрібно знайти людей з певними навичками і знаннями і запропонувати вигідні умови для співпраці до того як це зроблять конкуренти; технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності продукту.

Таблиця 7.13

**Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту**

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, створення реклами, взаємодія з органами державної влади.	95 %	1 рік

Продовж. табл. 7.13

Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення програмного забезпечення, тестування	80%	2 роки
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----	--------

Обрано альтернативу № 1.

Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 7.14

**Вибір цільових груп потенційних споживачів**

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Державні установи	Готові	Високий	Середня	Середня
Приватні підприємства	Готові	Високий	Середня	Середня

Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.



Таблиця 7.15

## Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів (портфеля укладених контрактів на постачання) і продуктивності підприємство може добитися менших витрат	Витрати на виробництво	Стратегія лідерства на витратах
2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару бути реальною або уявною.	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціального функціоналу та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію лідерства на витратах.

Таблиця 7.16

**Визначення базової стратегії конкурентної поведінки**

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Так	Так, основний функціонал і якісні показники	Наслідування лідера

Таблиця 7.17

**Визначення стратегії позиціонування**

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Оптична розв'язка НВЧ системи зі схемою управління, зменшення впливу однієї на іншу.	Лідерства на витратах.	Низька ціна, просте керування, компактність.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, наукоємність, співпраця.

## Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 7.18

**Визначення ключових переваг концепції потенційного товару**

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Просто та керування та оптична розв'язка	компактність	Використання дешевих матеріалів, висока надійність.

Таблиця 7.19

**Опис трьох рівнів моделі товару**

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Частотноселективна структура на основі неоднорідних мікросмужкових ліній зі ступінчатою неоднорідністю та керованими характеристиками.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/ Ор
	1. Сумісність з сучасними НВЧ системами.	М	
	2. Низька ціна 125 у.о.	М	
	3. Використання механізму керування	М	
	4. Система зручна в керуванні та налаштуванні.	М	
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія, надання кредиту.		
	Після продажу: монтаж, , доставка, обслуговування.		

Таблиця 7.20

**Визначення меж встановлення ціни**

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
-	200 – 1000 у.о.	10000 у.о. і вище	100 – 500 у.о.

Таблиця 7.21

**Формування системи збуту**

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Замовлення товару на сайті або у локального дистриб'ютора	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал першого рівня	Дистриб'ютор збуває продукцію покупцям

Таблиця 7.22

**Концепція маркетингових комунікацій**

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Використання товару у цілях фільтрування НВЧ сигналів та термокомпенсації.	Опосередковані - канал комунікації, коли інформація передається від інформатора до інформованої особи через дистриб'ютора.	Низька ціна, проста система керування	Поширення відомостей про сервіс, демонстрація солідарності підприємств, безумовного виконання взятих на себе зобов'язань; інформація про випробування товару і поліпшення його задля споживачів.	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликаному впливати на споживчі переваги покупців - наприклад, функціональну перевагу, задоволення, імідж, захоплення і альтруїзм.

**Висновки по розділу:**

Розглянуто принцип побудови та розроблення стартап проекту для керованого фільтра НВЧ на основі неоднорідних мікросмушкових ліній.

Отриманий результат є досить непоганим у порівнянні з існуючими конкурентами, і тому, може впроваджуватись на ринок.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи запропоновано 2 конструкції оптично керованих частотноселективних структур НВЧ на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній:

- конструкцію двохдіапазонного мікросмужкового фільтру НВЧ з дискретним перемиканням діапазонів за допомогою р-і-п фотодіодів. Проведено моделювання характеристик фільтру. Частота діапазонів відрізняється в 2 рази, що досягається за рахунок зміни характеру резонансу з півхвильового при неосвітленому фотодіоді на чвертьхвильовий при освітленому. Використання неоднорідних резонаторів дало змогу позбутися паразитних частотних складових до четвертої гармоніки включно. Перемикання діапазонів здійснювалось зі збереженням форми АЧХ;

- конструкцію фільтра на основі GaAs мікросмужкового резонатора. Керування здійснювалось декількома способами: за допомогою лампи змінного струму та за допомогою світлодіода.

При освітленні лампами змінного струму постійно присутня модуляція глибиною 3 – 4 дБ як у резонансному режимі, так і у нерезонансному режимі.

При освітленні GaAs підкладки світлодіодом з фокусуючою системою, одержано зміну коефіцієнту передачі від 27 дБ, без освітлення до 21 дБ. При цьому спостерігався 1%-ий зсув резонансної частоти у область нижчих частот.

## Список літератури

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника : Пер. с испан. С. И. Баскакова / Под ред. В. А. Терехова. – М.: Высш. шк., 1991. – 351 с. – ISBN 5-06-000820-7
2. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ. Учебник для вузов. Москва «Высшая школа», 1988.- 431 с.
3. Лебедев, Н.Д. Техника и приборы СВЧ:техника сверхвысоких частот, Том 1. [Текст] [под редакцией академика Н.Д. Девяткова] Москва «Высшая школа»,1970.-440 с.
4. Нефёдов, Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ [Текст] / [В.И. Гвоздев] Москва «Наука» Главная редакция физико-математической литературы,1985.-130 с.
5. Методичні вказівки до розрахунку ліній передачі інтегральних схем НВЧ .- Дніпропетровськ ДДУ,1998.-30 с.
6. Горошков, Б. И. Радиоэлектронные устройства: Справочник. - М.: Радио и связь, 1984. - 400 с. - (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1076).
7. Шрайбер, Г. 400 новых радиоэлектронных схем; [пер. с фр. – Абрамович К. А.]. Париж, ДМК Пресс, 2001. – 368 с.
- 8.Д.Д. Татарчук , В. И. Молчанов , Ю. В. Прокопенко . СВЧ фильтры на основе диэлектрических резонаторов с перестраиваемыми характеристиками // Тематический выпуск сборника "Электроника и связь" по материалам
- 9.Пьезоэлектрическая перестройка частоты диэлектрических резонаторов КВЧ/ С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко, С.А. Селиванов// Электронная техника. Сер.Электроника СВЧ.- 1988.- Вып.7(411).-С.6-10.



10. В. І. Молчанов, В. М. Пашков, Д. Д. Татарчук Резонатори на основі коротко замкнених відрізків неоднорідних ліній із ступінчастою неоднорідністю// *Електроника и связь*, Київ, 2002, №16, с. 47-48.
11. Беляев Б.А., Сержантов А.М. Коэффициенты связи нерегулярных микрополосковых четвертьволновых резонаторов.\\ "Microwave & Telecom Techn" (CriMiCo 2002), 2002, pp. 412-414.
12. Yu.V. Didenko, "Frequency and temperature dependences of dielectric losses in semiconductors on the RFCH," *Electronics and communication*, vol. 20, No. 3 (86), pp. 9–11, 2015.
13. Yu.V. Didenko, V.I. Molchanov, V.M. Pashkov, D.D. Tatarchuk, and A.S. Franchuk, "Temperature properties of semiconductor resonant structures with electronic control," *Electronics and communication*, No. 5 (76), pp. 9–12, 2013.
14. A. Seeds, A. De Salles, "Optical control of microwave semiconductor devices," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, No 5, pp. 577–585, 1990.
15. A. Seeds, "Microwave photonics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, No 3, pp. 877–887, 2002.
16. Mazur K.S. Filters based on segments of microstrip lines / K.S. Mazur, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.O. Serheieva // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24 – 26, 2018, Kyiv, Ukraine)*. – Kyiv, 2018. – PP. 177 – 180.
17. P. Yaghmaee, O. H. Karabey, B. Bates, C. Fumeaux, and R. Jakoby, "Electrically Tuned Microwave Devices Using Liquid Crystal Technology," *Int. J. Antennas Propag.*, pp. 1–9, 2013, DOI: 10.1155/2013/824214.
18. A. S. Nagra, O. Jerphagnon, P. Chavarkar, M. VanBlaricum, and R. A. York, "Bias free optical control of microwave circuits and antennas using improved optically variable capacitors," in *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017)*, 2000, vol. 2, pp. 687–690, DOI: 10.1109/MWSYM.2000.863276.

19. P. R. Herczfield, A. S. Daryoush, V. M. Contarino, A. Rosen, Z. Turski, and A. P. S. Khana, "Optically Controlled Microwave Devices and Circuits," in MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1985, pp. 211–214, DOI: 10.1109/MWSYM.1985.1131943.
20. Z. Vagra, G. Jaro, and T. Berceci, "Optical control of microwave filters using photodiodes," in 10th MICROCOLL Conference, 1999, pp. 299–302.
21. BRW41N. Product Data Amendment. – Vishay Telefunken, 1999. – 7 p.
22. М.С. Сергеев А.А. Сергеева К.С. Мазур, Збірник статей «X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2017» «Перестраиваемый СВЧ фильтр на основе неоднородных микрополосковых линий» - 2017 – С. 215-218.